



Universidad
Carlos III de Madrid

OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA DE LA AERODINÁMICA DE UN FORMULA STUDENT CON VIRTUAL WIND TUNNEL

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

por

Alumno: Álvaro León Gutiérrez

Tutor:

Dr. Daniel Gómez Lendínez

21 de junio de 2017

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de la carrocería de un vehículo, para competir en el Formula Student[2]. FSAE[2] es una competición internacional automovilística a nivel universitario, en la que se pone a prueba los conocimientos de los futuros ingenieros a la hora de realizar un monoplaza que cumpla con una normativa específica y una serie de eventos estáticos y dinámicos que se expondrán en el siguiente trabajo.

La idea principal del proyecto consiste en el desarrollo de diferentes prototipos que cumplan la normativa FSAE[3] y su posterior optimización mediante el uso del programa *Virtual Wind Tunnel* de Altair®[6], para conseguir un diseño óptimo. Éste será el que se empleará en la competición de Formula Student[2] 2017/2018, por parte del equipo de la Universidad.

En primer lugar diseñaremos el CAD de los diferentes prototipos mediante el programa *SolidWorks 2015 (Student Version)*[5], posteriormente realizaremos el mallado de los mismos con el programa *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6] para finalizar con el estudio CFD y la optimización de los resultados que realizaremos con el programa de túnel de viento de Altair®[6], *Virtual Wind Tunnel 13.1*.

Abstract:

This project presents the body design of a vehicle designated to compete at the Formula Student[2]. FSAE is an international engineering competition at a university level, where the knowledge of future engineers is tested by examining their ability to build a single-seat car that follows specific regulations and their capacity to perform in a series of static and dynamic events that will be introduced and explained in this project.

The main idea behind this project consists of the development of different prototypes that follow all FSAE[3] regulations and their later optimization by the use of the program *Virtual Wind Tunnel* from Altair®[6], in order to achieve an optimal design. This will be the one that will be used at the Formula Student[2] 2017/2018 competition by our university team.

First, we will design the CAD from the different prototypes by means of the program *SolidWorks 2015 (Student Version)*[5]. After that, we will complete the meshing using the program *Hypermesh Desktop 13.0* from Altair®[6]. In order to finish with the CFD study and optimization of the results that we will create with the program de Altair®[6].

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradeceré a mis padres, por estar ahí desde el principio, aguantando todos esos días de tensión, de agobios y de exámenes; sin poner ninguna mala cara y por supuesto, por disfrutar conmigo los mejores momentos que esta carrera también me ha dado. Por recorrerse cientos de kilómetros para ver como cumplíamos una ilusión en Montmeló y emocionarse como uno más. Sinceramente, muchas gracias.

Agradeceré también a toda mi familia, por perdonarme en cada cumpleaños que me he perdido por temas de estudio o trabajo, por todos esos cumpleaños que se me han olvidado felicitar, dejándolos para cuando acabe “esto”. Porque son los mejores y cada vez que nos juntamos es una subida de ánimo, muchas gracias.

A mis amigos de verdad, que han sufrido lo que es tener un amigo ingeniero, en ocasiones imaginario y otras muchas al pie del cañón, muchas gracias por seguir ahí como si nada.

A Irene, porque sé que si no se lee aquí, me mata, porque a pesar de todo, no hay quien le quite estos años de estudio intenso que ha soportado como una campeona, por ver como se introducía en la vida universitaria y como ahora está acabando con ella, por todos esos nervios pasados, por vivir cada nota como si fuera suya, los bolis de la suerte...en fin, gracias por todo.

Agradeceré también a todos mis profesores, que desde pequeño, me han empujado y apoyado para llegar a una vida universitaria bien preparado, también a aquellos que no apostaban nada por mí, que me han hecho ver que con las ideas claras y fuerza de voluntad se puede conseguir todo. A mis profesores de academia Miguel y Carlos, el primero por enseñarme lo equivocado que estaba en la manera de estudiar, por conseguir que un niño que suspendía en bachillerato matemáticas y física, pudiera sacarse limpio primero de carrera. Y a Carlos, muchas gracias por hacer comprensible para mí, lo incomprensible, por tu buen humor en cada clase y por todos esos fines de semana madrugando y currando de sol a sol por todos estos estudiantes que te necesitan.

Y como no, mención especial a todo el equipo de Formula Student UC3M. En primer lugar a mi tutor Daniel Gómez Lendínez, que confió en mí admitiéndome en el equipo, posteriormente dándome la oportunidad de ir a FIDAMC, donde aprendí muchísimo y este año ayudándome y guiándome en este proyecto, muchas gracias por todo tu tiempo. A todos

mis compañeros de FUC3M, donde puedo decir que me llevo amigos, por todos esos momentos inolvidables e irrepetibles que vivimos tanto en el proceso del coche, como en Montmeló. Por esas noches sin dormir, por esas ganas de solventar cada problema que se interponía en nuestro camino, porque finalmente lo conseguimos. Sois muy grandes equipo.

A FIDAMC, por el trato recibido, por todo lo que me ha enseñado sobre materiales compuestos, por abrirnos las puertas de sus instalaciones como si fuéramos uno más y darnos la confianza necesaria para sentirnos allí, como en casa.

También merecen una mención especial los miembros de Altair, por resolver cada duda en tiempo récord y estar siempre predispuestos a ayudar ante cualquier problema. Especialmente a Amadeo Tierno, por estar siempre al otro lado del correo, con buenas palabras, por invitarme a asistir a su sede en cada seminario, por estar siempre dispuesto a ayudar y preocuparse por el desarrollo de dicho proyecto. Muchas gracias, sin tí este proyecto tampoco hubiera sido posible.

Finalmente agradecer a todos los patrocinadores que han confiado en este proyecto del Formula Student UC3M, por dar su apoyo económico, intelectual o en especie a un grupo de chavales con un sueño y hacer que finalmente se haga posible. Muchas gracias y esperamos seguir contando con vuestro apoyo muchos años más.

Contenido

1. Introducción	3
1.1. FORMULA SAE®	4
1.1.1. Historia	5
1.1.2. Tipos de eventos y puntuaciones	6
1.1.3. Requisitos generales de diseño:	13
2. Objetivos:	17
3. Estado del arte	19
3.1. Evolución de la aerodinámica desde los inicios de la Fórmula 1	19
3.2. Evolución de la aerodinámica en el s.XXI	28
4. Fundamentos básicos de la Aerodinámica:	35
4.1. Fluidos:	35
4.1.1. Mecánica de Fluidos:	35
4.1.2. Propiedades de los fluidos:	36
4.2. Principios de la aerodinámica:	38
4.2.1. Principio de Bernoulli:	38
4.2.2. Efecto Venturi:	40
4.2.3. Efecto Coanda:	41
4.2.4. Resistencia Aerodinámica o “ <i>Drag</i> ”	42
4.2.5. Carga Aerodinámica o “ <i>Lift</i> ”	44
5. Aerodinámica de un Formula Student:	47
5.1. Los alerones:	47
5.1.1. El alerón delantero:	52
5.1.2. El alerón trasero:	53
5.2. La carrocería:	54
5.3. Fondo Plano:	55
5.4. El Difusor:	55
5.4.1. Doble difusor:	56
5.4.2. Difusor soplado:	57
5.5. Los Pontones:	58

5.5.1. Aletas del pontón:	60
5.6. Deflectores Laterales:	62
6. Dinámica Computacional de Fluidos y Túnel de Viento:	63
6.1. Tunel de Viento:	63
6.2. Dinámica Computacional de Fluidos, CFD:	66
6.3. Virtual Wind Tunnel:	68
6.3.1. Modelos de turbulencia:	69
6.3.2. Modelos computacionales para el cálculo de la turbulencia:	71
6.4. Acusolve:	73
6.4.1. Modelo de turbulencia utilizado por Acusolve:	74
7. Diseño y optimización de una carrocería Formula Student:	75
7.1. Bocetos en papel y conceptos generales:	75
7.2. Diseño en Cad, mallado y simulación:	78
7.2.1. Pasos a seguir en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6] :	80
7.2.2. Pasos a seguir en <i>Virtual Wind Tunnel 13.1</i> de Altair®[6] :	88
7.2.3. Optimización carrocería:	94
8. Procesos de Fabricación:	111
8.1. Automated Tape Laying Equipment, (ATL):	111
8.2. Método Húmedo:	119
8.3. Innovación en fabricación:	124
8.3.1. Constitución de las estructuras tipo <i>sandwich</i> :	124
8.3.2. Ventajas e inconvenientes de la estructura tipo <i>sandwich</i> :	125
8.3.3. Espuma utilizada:	126
9. Planificación:	127
10.Desarrollos Futuros:	131
10.1. Desarrollo en las herramientas de procesado:	131
10.1.1. Posibles mejoras en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®:	131
10.1.2. Posibles mejoras en <i>Virtual Wind Tunnel 13.1</i> de Altair®:	132
10.1.3. Posibles mejoras en el post-procesado:	132
10.1.4. Comparativa con diferentes programas de cálculo:	134
10.2. Desarrollo en la geometría del monoplaza:	134
10.2.1. Implantación de alerones:	135
10.2.2. Mejora de los difusores:	137
10.2.3. Mejora de los pontones:	137
11.Conclusiones:	139

12. Costes:	143
12.1. Costes de diseño y simulación:	143
12.2. Costes de material y fabricación:	144
13. Planos:	147

Lista de Figuras

1.1. Vehículo estilo fórmula, Universidad Delft [8]	4
1.2. Vehículo estio Baja <i>SAE</i> [®] , CSULA Baja Team [10]	5
1.3. Circuito "Skid-pad"[13]	9
1.4. Circuito Endurance con trazada[14]	11
1.5. Diagrama de sectores de la puntuación de las diferentes pruebas [15]	12
1.6. Esquema de zonas de exclusión.[2]	13
1.7. Esquema de batalla y ancho de vía de un monoplaza [3]	14
1.8. Restricciones de dispositivos aerodinámicos en función de la altura [3]	16
3.1. Gran Premio Argentina 1953 [16]	20
3.2. Masserati 250F, conducido por JM: Fangio[20]	20
3.3. Dos variantes del Mercedes-Benz W196 [21]	21
3.4. Lotus 25	21
3.5. Lotus 49B [26]	22
3.6. Tyrrel P34, primer y unico monoplaza con 6 ruedas [25]	22
3.7. Brabham BT44B y Lotus 72E [29]	23
3.8. Lotus 78 [28]	24
3.9. Perfil del Lotus 78 [28]	24
3.10. Brabham BT46B, a la vista su ventilador trasero [27]	25
3.11. Alerón de 4 planos del Lotus 93T [30]	26
3.12. Lotus 94T, con deflectores laterales[34]	26
3.13. Benetton B194 [35]	27
3.14. Ferrari F2001 del GP de Italia de 2001 [36]	28
3.15. Ferrari F2002, conducido por Michael Schumacher [37]	29
3.16. A la izq. McLaren MP4-22 conducido por F. Alonso, dcha. McLaren MP4-22 conducido por L. Hamilton [38]	29
3.17. Difusores traseros del Brawn GP Mercedes BGP01 [39]	30
3.18. Conductos del dispositvo F-Duct [41]	30
3.19. Redbull RB6 [42]	31
3.20. Diferencia en el morro del McLaren MP4-27 y el Ferrari F2012 [43]	32
3.21. Esquema de distribución del flujo de aire con el DRS [46]	32
3.22. DRS ideado por a. Newey [45]	33

4.1. Esquema del Principio de Bernoulli [53]	39
4.2. Esquema del tubo de Venturi [54]	40
4.3. Efecto Venturi adaptado a un F1 [65].	40
4.4. Sección alerón [55]	41
4.5. Esquema Efecto Coanda [56]	41
4.6. Coeficientes de resistencia aerodinámicos [58]	43
4.7. Formula 1 testado en tunel de viento. [59]	43
4.8. Relación entre fuerza lateral y vertical para un neumático en función del ángulo de deriva. [88]	44
4.9. Ángulo de deriva. [87]	45
4.10. Consecuencias de evolución del ángulo de deriva. [87]	45
5.1. Michigan FSAE 2013 [60]	47
5.2. Perfil de un alerón [61].	48
5.3. Experiencia de diferentes ángulos de ataque [62].	48
5.4. Sustentación contra ángulo de incidencia en perfil NACA 0012 [61]	49
5.5. Configuración de los flaps en alerón de tres elementos [61].	51
5.6. Curva de sustentación de un alerón de tres elementos [61].	51
5.7. Efecto de las derivas laterales [61].	52
5.8. Simulación por ordenador de BMW Sauber [62].	53
5.9. Comparación entre alerones en función del circuito	54
5.10. Flujo generado a través del difusor [61].	55
5.11. Diferentes vistas de un difusor	56
5.12. Doble difusor [65].	57
5.13. Flujo de aire del escape al difusor [66].	57
5.14. Pontón del monoplaza de la Universidad de Zürich. [67].	58
5.15. Branquias situadas en el pontón de un Mercedes [63].	59
5.16. Aleta anterior [68].	60
5.17. Aletas del pontón del equipo Minardi [69].	60
5.18. Aletas del pontón en la zona de escape [70].	61
5.19. Turbuladores sobre los pontones en Toro Rosso [71].	61
5.20. <i>Turning Vanes</i> de Ferrari F138 [71].	61
6.1. Maqueta de un monoplaza en el túnel de viento [73].	63
6.2. Esquema de una instalación de túnel de viento [74].	64
6.3. Esquema de fuerzas en un monoplaza [75].	65
6.4. Esquema de resultante de fuerzas en un monoplaza [75].	65
6.5. Software <i>Virtual Wind Tunnel 13.1</i>	66
6.6. Monoplaza simulado en CFD [77].	67
6.7. Ejemplo de malla de simulación [78].	68
6.8. Comparación entre flujo laminar y turbulento [83].	69
7.1. Boceto de posible carrocería V1 [Elaboración propia].	75

7.2. Boceto de posible carrocería V2 [Elaboración propia].	76
7.3. Boceto de posible carrocería V3 [Elaboración propia].	76
7.4. Boceto de posible carrocería V4 [Elaboración propia].	77
7.5. Diseño CAD de monoplaza base [Elaboración propia].	79
7.6. Plantilla masculina percentil 95 [3].	80
7.7. Selección de entorno en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	81
7.8. Selección Importar geometría en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6]. . .	81
7.9. Geometría importada en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	82
7.10. “Main Menu” en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	82
7.11. “Menu Scale” en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	82
7.12. “Menu Scale” en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	83
7.13. “Main Menu” en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	83
7.14. “Solid edit menu” en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	83
7.15. Diferencia tras la unión de componentes.	84
7.16. “Title Bar” en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	85
7.17. Geometría sin errores en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	85
7.18. “Main Menu” en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	86
7.19. “Automesh Menu” en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	86
7.20. Las ruedas malladas en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	87
7.21. Monoplaza mallado en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	87
7.22. Exportar documento en <i>Hypermesh Desktop 13.0</i> de Altair®[6].	88
7.23. Importar documento en <i>Virtual Wind Tunnel 13.1</i> de Altair®[6].	89
7.24. Posicionamiento del monoplaza en <i>Virtual Wind Tunnel 13.1</i> de Altair®[6].	89
7.25. Selección de ruedas en <i>Virtual Wind Tunnel 13.1</i> de Altair®[6].	90
7.26. “Refinement Zone” en <i>Virtual Wind Tunnel 13.1</i> de Altair®[6].	91
7.27. “Run” en <i>Virtual Wind Tunnel 13.1</i> de Altair®[6].	91
7.28. Diferentes propuestas de carrocería.	94
7.29. Carrocería seleccionada para el monoplaza.	95
7.30. Evolución del coeficiente de “Drag” en función de inclinación y longitud. . .	97
7.31. Evolución del coeficiente de “Lift” en función de inclinación y longitud. . .	97
7.32. Ensamblaje con fondo plano y difusores con inclinación 15° y longitudes 300mm y 350mm	98
7.33. Ensamblaje con fondo plano y difusores con inclinación 15° y longitudes 475mm y 450mm	99
7.34. Evolución del Coeficiente de “Drag” en función de la inclinación.	101
7.35. Evolución del Coeficiente de “Lift” en función de la inclinación.	101
7.36. Ensamblaje con difusores a 25° y longitudes límite.	102
7.37. Cálculo de alturas de pontón [FUC3M].	104
7.38. Ensamblaje con pontones rectos.	104
7.39. Vista Frontal del ensamblaje con pontones con curvatura.	105
7.40. Ensamblaje con pontones con curvatura.	106
7.41. Ensamblaje con pontones con curvatura modificados.	107

7.42. Vista Frontal del ensamblaje con pontones con curvatura modificados. . . .	108
7.43. Comparativa de eficiencias entre ensamblaje base y definitivo.	109
7.44. Comparativa de eficiencias entre ensamblaje 2016 y definitivo.	110
8.1. Máquina ATL [7].	112
8.2. Suelo estructural y retales conformados con ATL [7].	115
8.3. Piezas con corcho perimetral y ambas capas de A4000 [7].	115
8.4. Esquema bolsa de vacío [7].	116
8.5. Lámina de Yenil	116
8.6. Disposición del “ <i>Air weave</i> ” [7].	117
8.7. Vacío realizado [7].	117
8.8. Piezas tras el curado.	118
8.9. Exceso de resina [7].	118
8.10. Realización del redondeo del morro	119
8.11. Molde recubierto con capa de “ <i>tool-tec</i> ” [7].	120
8.12. Extendiendo la resina y recortando bordes sobrantes [7].	121
8.13. Colocando el yenil al difusor [7].	122
8.14. Morro y difusores con el vacío realizado [7].	122
8.15. Formula UC3M personalizado por Mercedes Benz-Madrid [80].	123
8.16. Estructura tipo <i>sandwich</i> [86].	124
9.1. “ <i>Timeline</i> ” general seguido [Elaboración propia].	128
9.2. Horas de trabajo invertidas. [Elaboración propia].	129
10.1. Líneas de corriente en vista de perfil.	132
10.2. Coeficientes de presión en la superficie del cuerpo.	133
10.3. Diferentes vistas de carrocería.	135
10.4. Comparación de líneas de corriente entre monoplaza con y sin alerones. Fuente: Carlos Sánchez, equipo FUC3M	136
10.5. Imagen doble difusor	137
11.1. Gráfica de diferentes eficiencias en función de la inclinación del difusor. . . .	140
12.1. Tabla de costes de diseño y simulación.	143
12.2. Tabla de costes totales de diseño y simulación.	144
12.3. Tabla de costes de material.	144
12.4. Tabla de costes de procesos de fabricación.	145
13.1. Vista trimétrica del monoplaza.	148
13.2. Vista frontal del monoplaza.	149
13.3. Vista de perfil y planta del monoplaza.	150
13.4. Vista de perfil y planta de la carrocería.	151
13.5. Vista de perfil y planta del fondo plano.	152
13.6. Vista de perfil y planta de los pontones.	153

13.7. Vista de perfil de piloto.	154
13.8. Vista de trimétrica, alzado y perfil de la rueda.	155

Lista de Tablas

1.1. Competiciones, ubicación y organización de los diferentes eventos de la FSAE[17]	6
7.1. Estudio carrocería 1 (coarse)	93
7.2. Estudio carrocería 1 (medium)	93
7.3. Comparativa entre carrocería inicial y definitiva.	95
7.4. Tabla de valores en función de inclinación y longitud	96
7.5. Valores de ensamblaje definitivo con difusores de 15° y longitudes 300mm y 350mm	98
7.6. Comparativa entre ensamblaje carrocería inicial y definitiva (medium)	98
7.7. Comparativa entre fondo plano y difusores con y sin carrocería	99
7.8. Valores de ensamblaje definitivo con difusores de 15° y longitudes 475mm y 450mm	100
7.9. Comparativa entre fondo plano y difusores con 15° de inclinación y longitudes en primer lugar 300mm y 350mm y longitudes límite.	100
7.10. Diferentes inclinaciones para difusores con longitud límite.	100
7.11. Valores de ensamblaje definitivo con difusores de 15° y longitudes 475mm y 450mm	102
7.12. Comparativa entre fondo plano y difusores con 15° y 25° de inclinación y longitudes límite.	103
7.13. Comparativa entre ensamblaje carrocería con difusores a 15° y carrocería con difusores a 25°	103
7.14. Valores de ensamblaje definitivo con pontones rectos.	105
7.15. Valores de ensamblaje definitivo con pontones curvos.	106
7.16. Valores de ensamblaje definitivo con pontones curvos modificados.	107
7.17. Valores de eficiencias de los diferentes difusores.	109
7.18. Valores de eficiencias de los diferentes ensamblajes.	109
7.19. Valores de eficiencias de los diferentes ensamblajes.	110
7.20. Valores de eficiencias de los diferentes ensamblajes.	110
7.21. Propiedades del aire.	110
8.1. Disposición de fibras en carenados laterales y fondo plano.	113
8.2. Disposición de fibras en suelo estructural.	114

11.1. Valores de eficiencias de los diferentes ensamblajes.	140
---	-----

Acrónimos:

SAE®: Society of Automitve Engineers, (Sociedad de Ingenieros Automotrices).

FSAE: Formula *SAE*®.

TFG: Trabajo Fin de Grado.

CAD: Diseño Asistido por Computadora.

CFD: Dinámica de Fluidos Computacional.

FIDAMC: Fundación para la Investigación, Desarrollo y Aplicación de Materiales Compuestos.

IET: Institution of Engineering & Technology, (Institución de Ingeniería y Tecnología).

IMechE: Institution of Mechanical Engineers, (Institución de Ingenieros Mecánicos).

SCCA: Sports Car Club of America, (Club de Coches Deportivos de América).

BLC: Business Logic Case, (Caso de lógica de negocios).

BOM: Bill Of Material, (Lista de materiales).

F1: Fórmula 1.

FIA: Federación Internacional del Automóvil.

AHTAES: Asociación de Educación Superior para Técnicos de Automóviles Húngaros.

VDI-TVH: Society for Vehicle and Traffic Technologies, (Sociedad para el Vehículo y Tecnologías de tráfico).

OVK: Online-Vermarkterkreis, (Círculo de los Vendedores en línea).

ATA: Associazione Tecnica dell'automobile, (Asociación Técnica Automovilística).

STA: Sociedad de Técnicos de Automoción.

CAS: Academia de Ciencias Checa.

RBR: Red Bull Racing.

DRS: Drag Reduction System, (Sistema de Reducción de Drag).

DDRS: Double Drag Reduction System, (Sistema de Doble Reducción de Drag).

BA: Borde de Ataque.

BF: Borde de fuga.

ATL: Automated Tape Laying Equipment, (Máquina de Encintado Automático).

RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes.

LES: Large Eddy Simulations.

DES: Detached-Eddy Simulation.

DNS: Direct Numerical Simulation.

MPI: Message Passing Interface.

CNC: Control Numérico por Computadora.

PLA: Poli-ácido Láctico.

ABS: Acrilonitrilo Butadieno Estireno .

CAE: Ingeniería Asistida por Computadora/ordenador.

Capítulo 1

Introducción

En el presente TFG, se tratará el desarrollo de una serie de prototipos de carrocerías de un coche tipo Formula Student, para su posterior optimización en busca de una carrocería eficiente que nos permita volver a asistir a cualquiera de los eventos FSAE[2], el año próximo con una buena actuación.

En primer lugar, se introducirá en qué consiste la competición Formula Student[2], donde se explicarán las bases principales de la competición y las diferentes pruebas a las que se someterán los vehículos. Se estudiará también más en profundidad la sección de la normativa vigente que afecta a los componentes aerodinámicos y la relevancia de las dimensiones del coche a la hora de diseñar.

El proceso de diseño comenzará con una elección de diferentes formas generales con las que crearemos diferentes prototipos, una vez elegidas, se realizará el diseño 3D con el programa *SolidWorks 2015*[5].

Posteriormente se realizará el mallado de los diseños para su posterior estudio CFD. Se ha utilizado el programa *HyperMesh Desktop 13.0* de Altair®[6]. Para el estudio CFD, se simularan dichos prototipos en el simulador de túnel de viento que nos proporciona la aplicación de Altair®[6], *Virtual Wind Tunnel 13.1*.

Finalmente, una vez estén realizados todos los cálculos se estudiarán los diferentes resultados, optimizando el más satisfactorio. Variaremos diferentes parámetros hasta conseguir una carrocería para competir en la FSAE[2] 2017/2018.

También se tratará de una manera muy general el posible procedimiento de fabricación y los materiales que emplearemos, esto permitirá que el diseño se convierta en una realidad, basándome en la experiencia y conocimientos que obtuve fabricando la anterior carrocería en FIDAMC[7].

1.1. FORMULA SAE®

La Formula Student, o también conocida como Formula *SAE*®[2], es una competición universitaria a nivel internacional, que se celebra anualmente. Esta competición viene descrita por la Society of Automotive Engineers, de la siguiente manera:

«La competición Formula *SAE*® es para que los estudiantes universitarios conciban, diseñen, fabriquen y compitan con un pequeño coche del tipo fórmula. Las restricciones en el marco del coche y el motor son muy reducidas para otorgar a los equipos la mayor flexibilidad posible a la hora de expresar su creatividad en el diseño del monoplace. El objetivo de los equipos es conseguir un vehículo capaz de completar satisfactoriamente los diferentes eventos que se describen en el documento FSAE Rules[3]. Dicha competición también brinda la oportunidad a los estudiantes de demostrar sus habilidades ingenieriles en comparación con miembros de otras universidades del resto del mundo.»

En cuanto a los principales objetivos del diseño del automóvil, cabe destacar que debe de ser un «vehículo del tipo fórmula» (ver Figura 1.1), se entiende como un vehículo monoplace, en el cual las ruedas están situadas en el exterior del cuerpo principal. A diferencia del resto de automóviles como los deportivos, todoterrenos o turismos, éstos no poseen las ruedas cubiertas por la carrocería o los guardabarros y su uso está limitado únicamente al mundo de la competición.

Dicho vehículo debe poseer unas prestaciones de alto nivel en términos de aceleración, frenado y maniobrabilidad, al igual que una durabilidad suficiente para realizar los diferentes eventos que se dan en la competición.



Figura 1.1: Vehículo estilo fórmula, Universidad Delft [8]

Otros factores a tener en cuenta a la hora de diseñar nuestro monoplace son la fiabilidad, el coste, la estética, el mantenimiento y la realizabilidad. Ya que la idea de la competición es la de una empresa que contrata los servicios de un grupo de ingenieros para realizar el prototipo, el cual debe cumplir todos los requisitos mencionados anteriormente. Los estudiantes también deben de hacer un plan de marketing del vehículo al igual que una serie de documentos que se mencionaran a lo largo del proyecto para cumplir los eventos estáticos.

1.1.1. Historia

El origen de la competición internacional se remonta al año 1978, cuando Mark Marshek de la Universidad de Houston se pone en contacto con el Departamento de Relaciones Educativas de *SAE*[®], donde insiste en crear una variante del evento ya existente llamado **Mini Baja** [9](ver Figura 1.2), caracterizado por la gran cantidad de restricciones técnicas. Esta nueva variante pasó a llamarse Mini Indy, ésta mucho más desafiante y con una cantidad menor de limitaciones que permitía a los estudiantes ser más creativos a la hora de diseñar.



Figura 1.2: Vehículo estio Baja *SAE*[®], CSULA Baja Team [10]

En 1981 en la Universidad de Texas se celebra por primera vez la competición de Formula *SAE*[®] [2], en la que participan seis equipos, con un total de cuarenta alumnos. Ya en 1985 se establecen nuevas limitaciones como la restricción del diámetro de la admisión de aire, que se restringe a 23 milímetros. En 1990 la Universidad de Cornell batió el récord del skid-pad con 1.32g de empuje, gracias al efecto suelo, generado por un dispositivo de emisión de una gran carga aerodinámica gracias a la rotación de un ventilador situado en la parte trasera del monoplaza. Esto obligó a la *SAE*[®] a realizar un cambio inmediato de las reglas, donde se prohibieron el uso de este tipo de dispositivos activos.

El año 1991 fue también un año importante en cuanto a la implantación de nuevas reglas, ya que en dicha competición por primera vez dos universidades emplearon el concepto de ala invertida como componente aerodinámico en sus monoplazas. Provocando que de nuevo la *SAE*[®] actuara restringiendo la dimensión y ubicación de dichos dispositivos.

Con el paso de los años la competición fue popularizándose, llegando a albergar hasta 71 vehículos en 1995. En Reino Unido, en el año 1998 se realizó una demostración en la cual competían dos monoplazas americanos contra dos europeos, el impacto que generó dicho evento fue tal que con, el IET “Institution of Engineering & Technology”, el IMechE “Institution of Mechanical Engineers” y la colaboración de la *SAE*[®], se creó la Formula Student [2], como hoy la conocemos, como una competición internacional universitaria basada en diseñar,

fabricar y competir con vehículos tipo fórmula. Actualmente, la competición se ha expandido y como parte de la Official Formula Sae Series y regidos por la normativa de las Formula Sae Rules[3] participan más de 200 equipos universitarios de todo el mundo, en diferentes países como son los mostrados en la Tabla 1.1.

COMPETICIÓN	UBICACIÓN	ORGANIZACIÓN
Formula SAE Michigan	Michigan, USA	SAE® International
Formula SAE Lincoln	Nebraska, USA	SAE® International
Formula SAE Electric	Nebraska, USA	SAE® International
Formula SAE Australasia	Australia	SAE® Australasia
Formula SAE Brazil	Brasil	SAE® Brazil
Formula SAE Italy	Italia	ATA
Formula Student	United Kingdom	IMechE
Formula Student Austria	Austria	OVK
Formula Student Germany	Alemania	VDI-TV
Student Formula Japan	Japón	JSAE
Formula Student Spain	España	STA
Formula Student Hungary	Hungría	AHTAES
Formula Student Czech Republic	República Checa	CAS
Formula Student Russia	Rusia	FSR

Tabla 1.1: Competiciones, ubicación y organización de los diferentes eventos de la FSAE[17]

1.1.2. Tipos de eventos y puntuaciones

Según la normativa vigente la competición está dividida en eventos estáticos, formados por: presentación, diseño y análisis de costes. Y eventos dinámicos que son aceleración, skid-pad, autocross, resistencia y consumo.

Antes de comenzar con los eventos estáticos anteriormente citados, debemos mencionar que existe en este grupo otro evento, en este caso no puntuado, pero igualmente necesario que es la inspección técnica. Cuyo objetivo es determinar si el vehículo respeta las FASE Rules[3]. Cada vehículo debe pasar todas y cada una de las partes de la inspección técnica, consiguiendo así la pegatina que lo acredita. Todos los equipos deben mostrar dichos distintivos en un lugar visible del vehículo para poder acceder a cualquier evento dinámico o correr en la pista de pruebas.

Comenzamos detallando los eventos estáticos anteriormente citados:

1.1.2.1. Presentación:

El objetivo de la presentación es comprobar la capacidad del equipo para desarrollar y entregar un modelo de negocio capaz de convencer a los ejecutivos de que el diseño es el mejor y satisface la demanda del mercado de competición amateur, incluyendo SCCA (Sports Car Club of America), y que puede ser fabricado y comercializado de manera rentable.

En el que los jueces tendrán que ser tratados como si fueran ejecutivos de una empresa, y asumir que no solo abarca el campo de la ingeniería, sino que también representa diferentes áreas como son la producción, el marketing o las finanzas.

Todos los miembros del equipo que formen parte de la presentación deberán estar situados en el podium y éstos deberán de responder a las posibles preguntas que le haga el jurado, a pesar de no haber hablado durante la presentación. Sólo el jurado podrá realizar las preguntas y sólo los miembros de la presentación podrán responderlas.

Los jueces evaluarán el evento teniendo en cuenta el contenido, la organización, los recursos visuales utilizados, la entrega y la respuesta del equipo a las diferentes preguntas.

1.1.2.2. Diseño:

En dicho evento se valora el grado de esfuerzo y dedicación que se ha realizado en el diseño del monoplaza. También se evaluará cómo la ingeniería aplicada en el vehículo cumple con las expectativas del mercado, tanto en términos de rendimiento como en valor del coche en general.

El jurado podrá revisar el BLC (Business Logic Case) que ha sido entregado antes del evento. Ya que el vehículo deberá respetar los mismos propósitos que han sido presentados en dicho documento.

Cada equipo deberá presentar un informe del diseño, que deberá estar formado por 4 páginas de texto, 3 páginas de dibujos o imágenes y 1 página opcional.

1.1.2.3. Análisis de costes:

El objetivo de dicho evento es enseñar a los participantes que los costes y los presupuestos son factores que deben ser tenidos en cuenta en cualquier trabajo ingenieril. Consigue que los equipos ganen experiencia trabajando con Tablas de Materiales (BOM). También muestra la importancia de tener en cuenta los procesos de fabricación a la hora de diseñar, realizando un diseño que permita ahorrar costes tanto en material como en fabricación.

Para realizar los presupuestos se utilizarán unas tablas de precios estandarizadas para que sea independiente de la localización geográfica del equipo.

El evento consta de tres partes, el informe de costes, que será enviado a los jueces antes de la competición. El debate, en el que los jueces alrededor del coche evalúan no sólo el coste del monoplaza, sino también la capacidad del equipo de hacer una evaluación tanto de costes como de la ingeniería interna ajustada. Y por último, un escenario real donde los estudiantes tendrán que responder a un desafío relacionado con el coste y la fabricación del vehículo.

A continuación hablaremos de los eventos dinámicos, en los cuales se valora el funcionamiento del vehículo. En este caso, cada equipo puede disponer de dos conductores, en los que cada uno de ellos tendrá dos oportunidades para realizar cada evento. Definiremos en las próximas líneas más detalladamente los eventos dinámicos, que están formados por:

1.1.2.4. Aceleración:

El evento de la aceleración, como su nombre indica, evalúa la aceleración del vehículo en un terreno recto y plano. En la cual el monoplaza deberá recorrer un total de 75 metros, limitados por un camino de conos a una distancia de 4,9 metros de ancho.

El vehículo debe iniciar desde el reposo, en esta prueba comenzará con un margen de 30 centímetros desde las ruedas motrices hasta la línea de salida, evitando así el tiempo de derrapaje. La ecuación (1.1) se utiliza para determinar las puntuaciones del evento

$$ACCELERATION\ SCORE = \left(71,5 \cdot \frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{your}} \right) - 1}{\left(\frac{T_{max}}{T_{min}} \right) - 1} \right) + 3,5 \quad (1.1)$$

- **Tmin:** El tiempo realizado por el coche más rápido de la prueba.
- **Tyours:** Mejor tiempo realizado por el equipo en la prueba.
- **Tmax:** Tiempo máximo estipulado para cada prueba.

1.1.2.5. Skid-pad:

El objetivo de la prueba es la de evaluar la capacidad del coche de soportar las fuerzas laterales cuando se le somete a un giro de radio constante en una superficie plana.

El circuito consta de dos pares de circunferencias concéntricas de diámetro interior 15,25 metros y exterior 18,25 metros, con una separación entre centros de 18,25 metros. En la Figura 1.3 que mostramos a continuación, se muestra el diseño del *Skid-pad* y las direcciones de conducción.

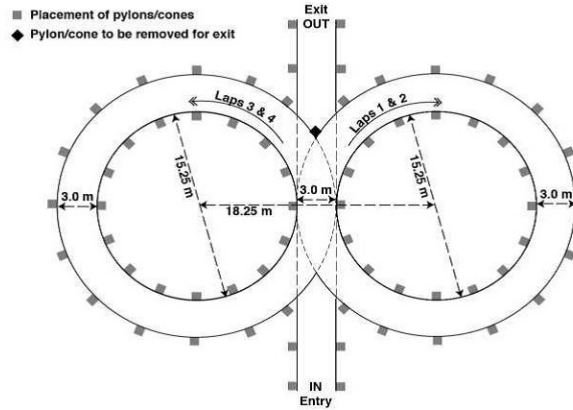


Figura 1.3: Circuito "Skid-pad" [13]

El proceso de puntuación sigue la ecuación (1.2):

$$SKID\ PAD\ SCORE = \left(47,5 \cdot \left(\frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{your}} \right)^{2-1}}{\left(\frac{T_{max}}{T_{min}} \right)^{2-1}} \right) \right) + 2,5 \quad (1.2)$$

- **Tmin:** El tiempo realizado por el coche más rápido de la prueba.
- **Tyours:** Mejor tiempo realizado por el equipo en la prueba.
- **Tmax:** Tiempo máximo estipulado para cada prueba.

1.1.2.6. Autocross:

El objetivo de esta prueba es el evaluar la maniobrabilidad y manejo del monoplaza en un circuito cerrado, sin el estorbo de los coches que compiten. La velocidad media es entorno a los 40-48 km/h. La longitud del circuito es aproximadamente 805 metros. Y consta de:

- **Rectas:** No superan los 60 metros con horquillas a los extremos, o 45 metros con curvas abiertas.
- **Curvas constantes:** Diámetros entre 23 - 45 metros.
- **Curvas en horquilla:** Con un diámetro mínimo de 9 metros.
- **Eslálones:** Conos en línea recta con espaciado de 7,62 a 12,19 metros.

- **Misceláneos:** Chicanes, curvas múltiples, curvas con radio decreciente, etc. La anchura mínima de vía será de 3,5 metros.

La valoración de la prueba sigue la ecuación (1.3):

$$AUTOCROSS SCORE = \left(142,5 \cdot \frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{your}} \right) - 1}{\left(\frac{T_{max}}{T_{min}} \right) - 1} \right) + 7,5 \quad (1.3)$$

- **Tmin:** El tiempo realizado por el coche más rápido de la prueba.
- **Tyours:** Mejor tiempo realizado por el equipo en la prueba.
- **Tmax:** Tiempo máximo estipulado para cada prueba.

1.1.2.7. Endurance y Consumo:

El evento de resistencia (Endurance) y el de consumo son eventos separados, pero que se realizan simultáneamente. El objetivo de los mismos es la de comprobar el rendimiento global del vehículo y evaluar la durabilidad del mismo, sometiéndolo a un esfuerzo en un tiempo prolongado. A diferencia del "autocross", en este evento existe la presencia de otros vehículos en pista. Para el evento de consumo, se medirá el combustible empenado en dicha prueba.

La prueba consiste en recorrer el circuito (observese Figura 1.4) hasta completar un recorrido de 22 kilómetros. En los cuales se debe realizar el cambio de piloto cada 11km, su duración no puede sobrepasar los 3 minutos y se realizará en la zona específica. A lo largo de la prueba no se permitirá realizar ninguna reparación en el coche.

El circuito consta de:

- **Rectas:** No superan los 77 metros con horquillas a los extremos, o 61 metros con curvas abiertas, en ambas de ellas habrá zonas de adelantamiento.
- **Curvas constantes:** Diámetros entre 30 - 54 metros.
- **Curvas en horquilla:** Con un diámetro mínimo de 9 metros.
- **Eslálones:** Conos en línea recta con espaciado de 9 a 15 metros.
- **Misceláneos:** Chicanes, curvas múltiples, curvas con radio decreciente, etc. La anchura mínima de vía será de 4,5 metros.

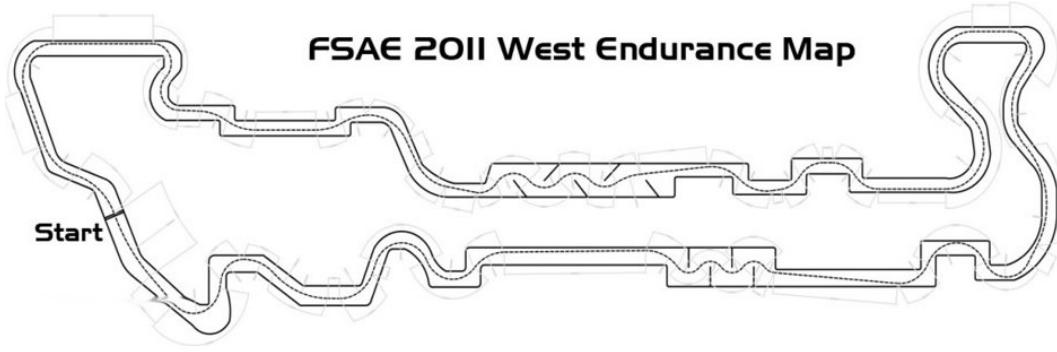


Figura 1.4: Circuito Endurance con trazada[14]

Los procesos de evaluación de dichas pruebas son diferentes, en primer lugar la ecuación 1.4 muestra el criterio de evaluación del evento de resistencia.

$$ENDURANCE\ SCORE = \left(250 \cdot \frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{your}} \right) - 1}{\left(\frac{T_{max}}{T_{min}} \right) - 1} \right) + 50 \quad (1.4)$$

Mientras que la valoración del consumo sigue la ecuación 1.5

$$EFF\ SCORE = \left(100 \cdot \frac{\left(\frac{FuelEfficiencyFactor_{max}}{FuelEfficiencyFactor_{your}} \right) - 1}{\left(\frac{FuelEfficiencyFactor_{min}}{FuelEfficiencyFactor_{max}} \right) - 1} \right) \quad (1.5)$$

Para calcular el factor de eficiencia de combustible utilizamos la ecuación 1.6

$$EFF.\ FACTOR = \left(\frac{\left(\frac{T_{min}}{Laptotal_{Tmin}} \right)}{\left(\frac{T_{yours}}{Lapyours} \right)} \right) \cdot \left(\frac{\left(\frac{CO2min}{Laptotal_{CO2min}} \right)}{\left(\frac{CO2your}{Lapyours} \right)} \right) \quad (1.6)$$

Para las ecuaciones hemos utilizado la misma nomenclatura que es la siguiente:

- **Tmin:** El tiempo realizado por el coche más rápido de la prueba.
- **Tyours:** Mejor tiempo realizado por el equipo en la prueba.
- **Tmax:** Tiempo máximo estipulado para cada prueba.
- **CO2min:** La menor masa de CO2 generada en la prueba por cualquiera de los participantes.

- **CO2your:** La masa de CO2 generada por el equipo en la prueba.
- **Lapyours:** Número de vueltas puntuadas por el equipo en la prueba
- **Laptotalmin y LaptotalCO2min:** Será el número de vueltas completadas por los equipos que establecen Tmin y CO2min , respectivamente.
- **Fuel Efficiency Factor min:** Se calcula utilizando CO2your equivalente a 60,06 kg-CO2/100km y Tyours se establece en 1,45 veces el tiempo de vuelta media corregida del equipo más rápido que completa el evento .

Evaluación de los coches:

Como hemos mencionado anteriormente cada uno de los eventos es puntuado individualmente, sumando un total de 325 puntos en eventos estáticos y 675 puntos por parte de los dinámicos, haciendo un total de 1000 puntos. En el siguiente diagrama 1.5 podemos observar los porcentajes de la competición.

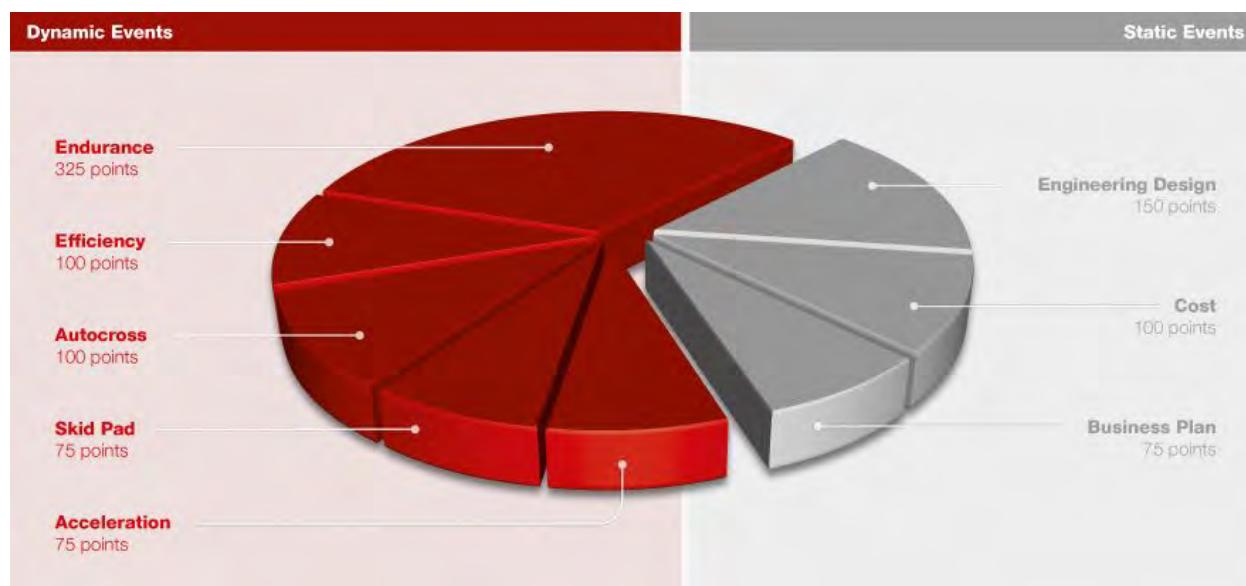


Figura 1.5: Diagrama de sectores de la puntuación de las diferentes pruebas [15]

1.1.3. Requisitos generales de diseño:

En este apartado se mencionará el artículo 2: “*General Design Requirements*” de la *SAE*® Rules [3]. En el que se tratan los requisitos generales que se han de tener en cuenta en la configuración del vehículo, en la carrocería, la distancia entre ejes, ancho de vía y los accesos de la carrocería.

En primer lugar hablaremos de la configuración del vehículo, en esta competición el coche debe ser de estilo fórmula, que como hemos mencionado anteriormente en el presente proyecto, quiere decir que ninguna de sus 4 ruedas está cubierta por carrocería y que el “*cockpit*”, la zona del piloto, debe ser abierta. Para que la posición de las ruedas se considere “Open Wheel” debe satisfacer los siguientes requisitos:

1. Los 180 grados superiores de la rueda o neumático no deben estar obstruidos por ningún objeto visto desde la planta del vehículo.
2. Las ruedas tampoco deben estar obstruidas vistas desde la vista frontal del vehículo.
3. Ninguna parte del vehículo debe traspasar la zona de seguridad formada por dos líneas situadas a 75 milímetros de la zona frontal del neumático y a otros 75 milímetros de la zona trasera del mismo. Esta zona de seguridad se extiende lateralmente desde el plano exterior de la rueda al plano interior de la misma.

Todas las medidas se realizarán desde el diámetro exterior del neumático y el ancho exterior del mismo. Para las inspecciones se utilizarán siempre los neumáticos de seco. Obsérvese la Figura 1.6 donde se muestran las zonas de exclusión.

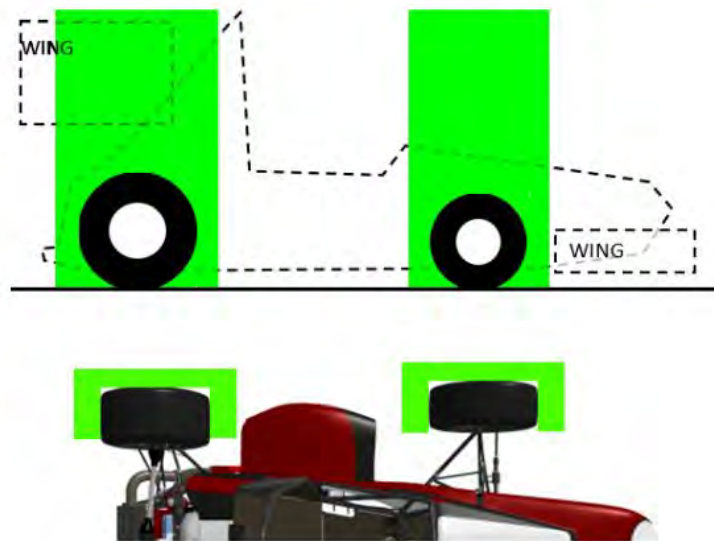


Figura 1.6: Esquema de zonas de exclusión.[2]

En cuanto a la carrocería no deben existir aberturas a través de la misma en el compartimento del conductor, desde la parte frontal del vehículo al arco de seguridad o *firewall*, sólo están permitidos pequeños orificios alrededor de los componentes de la suspensión.

La distancia entre ejes debe ser al menos de 1525 milímetros. Esta distancia se mide desde el punto de contacto con el suelo del neumático delantero, al mismo punto del trasero. Siempre se realizará la medición con los neumáticos orientados al frente.

También existen limitaciones en cuanto a la vía del vehículo, entiéndase vía como la distancia entre ruedas de un mismo eje. En la que la distancia más pequeña no puede ser menos de un 75 % respecto de la mayor (ver figura 1.7)

Ésta es una de las normas que se centra en el aspecto geométrico del vehículo, y dado que dichas medidas repercuten en el funcionamiento del coche, deben de ser limitadas y reguladas por la FSAE Rules[3].

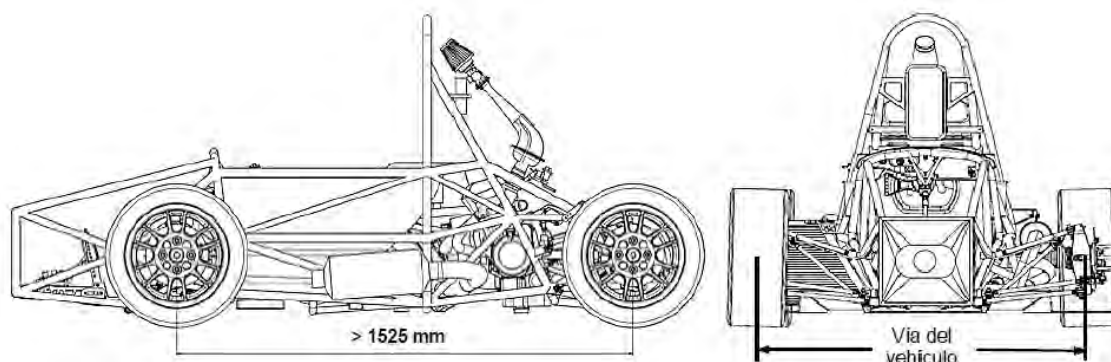


Figura 1.7: Esquema de batalla y ancho de vía de un monoplace [3]

Finalmente acerca de los accesos, se debe tener en cuenta que todos los elementos que forman parte del proceso de inspección deben estar visibles para los inspectores técnicos, sin que éstos deban utilizar ningún tipo de utensilio auxiliar como espejos o endoscopios. Para que esta visibilidad sea posible se puede proporcionar a la carrocería paneles desmontables.

1.1.3.1. Requisitos para los dispositivos aerodinámicos:

Todos los dispositivos aerodinámicos que se diseñarán a lo largo del siguiente proyecto deberán cumplir los siguientes requisitos.

Localización-Dispositivos frontales: Ningún dispositivo aerodinámico, alerón, fondo plano o *splitter* puede estar más alejado de 700 milímetros de la parte frontal del neumático delantero (medido a la altura de los centros).

Visto el vehículo desde la parte delantera, la parte de las ruedas que diste más de 250 milímetros del suelo, no puede ser obstruida por ningún dispositivo aerodinámico a excepción de las superficies verticales que tengan un espesor menor de 25 milímetros.

Localización-Dispositivos traseros: Visto el vehículo en planta, ningún dispositivo aerodinámico, alerón, fondo plano o *splitter* puede estar más alejado de 250 milímetros de la parte más retrasada del neumático trasero, es decir, el borde exterior del neumático a la altura de los centros.

Localización-General: En alzado lateral, ninguna parte del alerón trasero o dispositivo aerodinámico (incluyendo placas terminales) puede ser mayor de 1,2 metros sobre el suelo. Realizándose esta medida siempre sin conductor.

Ningún dispositivo aerodinámico puede superar la línea ficticia que se crea conectando las superficies exteriores de los neumáticos delanteros y traseros a la altura de los centros de las ruedas. Los dispositivos aerodinámicos, u otra carrocería, situados entre los planos transversales colocados en las líneas centrales del eje delantero y trasero no deben exceder la altura de 500 milímetros por encima del suelo, al igual que en el caso anterior se medirá siempre sin el piloto en el vehículo.

Radios mínimos de los bordes de los dispositivos aerodinámicos: Todo canto de cualquier tipo de dispositivo aerodinámico que mire hacia adelante y pueda estar en contacto con cualquier peatón, debe de tener un radio mínimo de 5 milímetros, en caso de ser horizontal. Los bordes verticales pueden tener un radio mínimo de 3 milímetros.

Dispositivos de efecto suelo: Están totalmente prohibidos cualquier tipo de dispositivo de alimentación que pueda ser utilizado para mover o eliminar aire de debajo del vehículo, excepto aquellos ventiladores que han sido diseñados para un uso exclusivo de refrigeración.

Estabilidad y resistencia de los dispositivos aerodinámicos: Todos los dispositivos aerodinámicos deben de estar diseñados de tal manera que su montaje proporcione una rigidez adecuada, tanto en condiciones estáticas como en dinámicas. En esta inspección técnica será verificada por empuje la rigidez de los dispositivos, en cualquier dirección y en cualquier momento. Si se aprecia que la oscilación es significativa, se le puede proporcionar a dicho dispositivo una fuerza de aproximadamente 200 N, tras la cual la deformación resultante no debe ser mayor a 10 milímetros ni la permanente mayor de 5 milímetros.

Cualquier vehículo que pueda ser considerado un riesgo para la competición en estos aspectos, puede ser inspeccionado por los operarios e incluso excluido de la carrera hasta la rectificación o eliminación del problema.

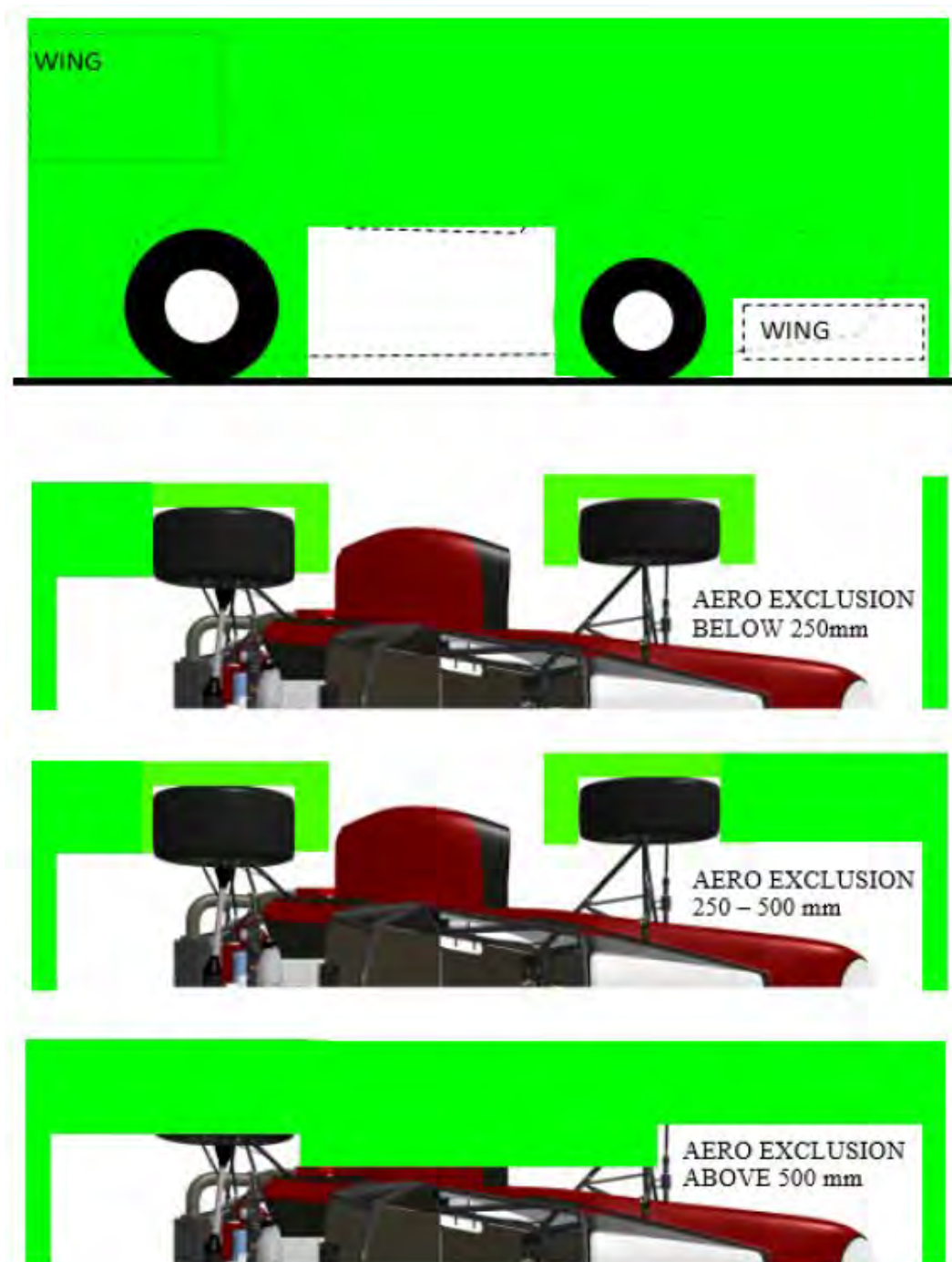


Figura 1.8: Restricciones de dispositivos aerodinámicos en función de la altura [3]

Capítulo 2

Objetivos:

El presente trabajo fin de carrera tiene los siguientes objetivos:

- Realizar el diseño de una carrocería que permita mejorar el buen rendimiento y la correcta dinámica en pista del monoplaza del año anterior. Para ello se deberán mejorar los valores de resistencia y carga aerodinámica, en busca de una mayor eficiencia.
- Validar el uso de *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®[6], como nueva herramienta de cálculo en el equipo FUC3M.
- La elección del diseño óptimo en función de la relación de eficiencias aerodinámicas entre las diferentes opciones.
- Realizar un estudio aerodinámico detallado que nos permita conseguir puntos para las pruebas estáticas.
- Conseguir que el vehículo vuelva a ser atractivo para los patrocinadores y el público general de la competición, como lo fue el año pasado.

Capítulo 3

Estado del arte

3.1. Evolución de la aerodinámica desde los inicios de la Fórmula 1

Para comprender la competición de Formula Student, debemos tener claro sus orígenes y saber que todo parte de la competición madre que es la Fórmula 1. En el siguiente capítulo se detallará la evolución que ha sufrido la F1 desde sus inicios hasta la actualidad. Permi-tiéndonos conocer cómo son los monoplazas en los que basaremos nuestros diseños.

La Fórmula 1 ha sufrido infinidad de cambios en sus apenas 60 años de historia. Y como observaremos en el siguiente capítulo, sus inicios para nada tienen que ver con la competición que conocemos hoy en día.

Me centraré en la evolución sufrida de los dispositivos aerodinámicos y en cómo la aerodinámica se ha llegado a convertir en una pieza clave. A tal punto que, las escuderías se gastan cientos de millones de euros en su investigación y desarrollo.

Las dos ideas básicas a desarrollar por los ingenieros son muy sencillas de describir, pero como se comprobará a lo largo del capítulo, serán un quebradero de cabeza conseguirlas, debido a que la normativa varía, poniendo a prueba el ingenio de los mismos. En primer lugar, se encuentra el objetivo de crear carga aerodinámica, lo que permite aumentar la adherencia sobre la pista, mejorando el ángulo de deriva lateral. Y por último, minimizar la resistencia aerodinámica, que en posteriores capítulos se explicará con más detalle.

Para comprender la evolución de la aerodinámica en la F1, debemos comprender el papel secundario en la que se encontraba. La mentalidad de la época era completamente diferente a la actual; donde el motor acaparaba el protagonismo. Los ingenieros competían por la construcción del motor más potente, dejando la aerodinámica del monoplaza en segundo plano.



Figura 3.1: Gran Premio Argentina 1953 [16]

Estos ideales, definían a la perfección la perspectiva de los ingenieros y la manera de fabricar sus coches, donde todo se centraba en un gran motor situado en la parte trasera del vehículo y bien anclado al chasis, con la carrocería que únicamente lo recubría, intentando crear la menor resistencia aerodinámica posible. De este concepto, podemos destacar uno de los monoplazas más famosos de la historia de la F1, el Maserati 250F (ver Figura 3.2) con motor V12 y 326 CV de potencia.



Figura 3.2: Maserati 250F, conducido por JM: Fangio[20]

La forma tubular de los años 50, no poseía elementos externos, exceptuando la salida de los escapes y las tuberías hidráulicas. El habitáculo del piloto se encontraba en el centro del monoplaza y estaba expuesto a fuertes corrientes de aire, de ahí que fuera necesaria la instalación de un parabrisas alto y curvo, disminuyendo así la fuerza del aire contra el piloto. Sobre el lado derecho del capó, (visto desde el asiento del piloto) se observa una pequeña entrada de aire que servía como refrigeración del motor.

Con unos objetivos aerodinámicos únicamente focalizados en la disminución de la resistencia aerodinámica, para obtener así una mayor velocidad punta, las ruedas estrechas pero de diámetros elevados situadas fuera de la estructura representaban un obstáculo aerodinámico importante. Tras las ruedas delanteras se creaba una gran cantidad de turbulencias, que con el crecimiento de la velocidad, la cantidad de potencia absorbida por la resistencia aerodinámica aumentaba de manera exponencial. Empeorando de una manera notable el rendimiento del auto.

A mitad de los años 50 para solucionar dicho problema se desarrolló la carrocería que podemos observar en el Mercedes-Benz W196S (vehículo de la derecha en la Figura 3.3) donde las ruedas se encuentran tras la carrocería.



Figura 3.3: Dos variantes del Mercedes-Benz W196 [21]

En este modelo podemos observar en su morro la entrada de aire de refrigeración del motor, totalmente integrado en la carrocería. Esta disposición permitía al aire recorrer el cuerpo del monoplaza sin encontrar obstáculos. El parabrisas también sufrió ligeros cambios, disminuyendo su altura hasta igualarla con el volante.



(a) En competición [23]



(b) Monocasco al descubierto [24]

Figura 3.4: Lotus 25

Antes de entrar con los primeros vehículos con dispositivos aerodinámicos externos cabe destacar el Lotus 25 (ver Figura 3.4a) que en 1963 fue el primer coche en montar chasis monocasco (ver Figura 3.4b), sustituyendo el chasis tubular, de esta manera se consiguió aligerar de una manera considerable el peso de los futuros monoplazas.

La era de la aerodinámica no comienza hasta 1967, de la mano del ingeniero Colin Chapman. Cuando se pudieron adaptar por primera vez los dispositivos alares en la F1, en este caso en el famoso Lotus 49B, (ver Figura 3.5).



Figura 3.5: Lotus 49B [26]

El objetivo no era otro que ejercer una fuerza al vehículo contra el suelo, de ahí la colocación de los alerones. En capítulos posteriores, nos centraremos en los conceptos teóricos, en este apartado simplemente veremos la evolución de los mismos. Como observamos en la Figura 3.5 el alerón trasero estaba formado por un enorme perfil, dotado de un sistema de regulación del ángulo de incidencia y anclado directamente al eje trasero. Consiguiendo descargar así toda la fuerza aerodinámica en las ruedas motrices, dando como resultado una mayor adherencia entre el neumático y el suelo. De igual manera se instalaron dos perfiles en la parte delantera, generando así fuerza aerodinámica también en las ruedas directrices.



Figura 3.6: Tyrrel P34, primer y unico monoplaza con 6 ruedas [25]

En la década de los 70 cabe destacar el curioso Tyrrell P34 (ver Figura 3.6). Como hemos mencionado anteriormente las ruedas creaban una gran carga de resistencia aerodinámica, para conseguir un área frontal menor y así incrementar el flujo de aire, decidieron dotar al monoplaza de 4 ruedas de menor diámetro en el eje delantero. El concepto no tuvo mucho éxito, pues tan sólo consiguió ganar 1 carrera de 30, pero el Tyrrel P34, pasó a la historia por ser uno de los coches más peculiares de la F1.

Otro de los avances que realizó Lotus en esta década gracias a la disposición lateral de los radiadores, fue la de aminorar la superficie frontal del morro, consiguiendo así una menor resistencia al aire y con ayuda de los alerones un mayor aprovechamiento de su flujo. Esta vez sí, un concepto que permanece hasta nuestros días, pero en su momento no compartido por todas las escuderías. En la Figura 3.7 podemos observar a la izquierda el Brabham BT44B con los radiadores al frente, y al fondo de la imagen el Lotus 72E con los radiadores en los laterales y un morro mucho más estrecho.



Figura 3.7: Brabham BT44B y Lotus 72E [29]

Los primeros experimentos con alerones móviles y las nuevas monturas, propiciaron una gran cantidad de accidentes, obligando a la FIA a introducir nuevas regulaciones limitando el tamaño y la ubicación de los mismos. Con el paso de los años estas normas han ido evolucionando y a día de hoy siguen estando presentes.

Tras unos años de malos resultados con la escudería Lotus, el ya mencionado ingeniero de Lotus, Colin Chapman, dio vida en 1977 al antecesor de los “wings car” el Lotus 78 (ver Figura 3.8). El primer vehículo en utilizar el efecto suelo, de ahí su transcendencia. El efecto suelo era generado por el diseño especial de la parte inferior del monoplaza, que lograba generar un efecto Venturi que disminuía la presión del aire debajo del vehículo provocando que la diferencia de presiones generase una succión que mejoraba en gran medida el agarre de los neumáticos al suelo, permitiendo tomar las curvas a mayor velocidad.



Figura 3.8: Lotus 78 [28]

El perfil de estos monoplazas tenía forma de ala, pero el gran secreto del Lotus 78 fue la aparición de las faldillas laterales cuya función era la de guiar el aire y evitar que éste se escapara por los laterales del monoplaza. Con la Figura 3.9 entenderemos mejor el funcionamiento del efecto suelo.

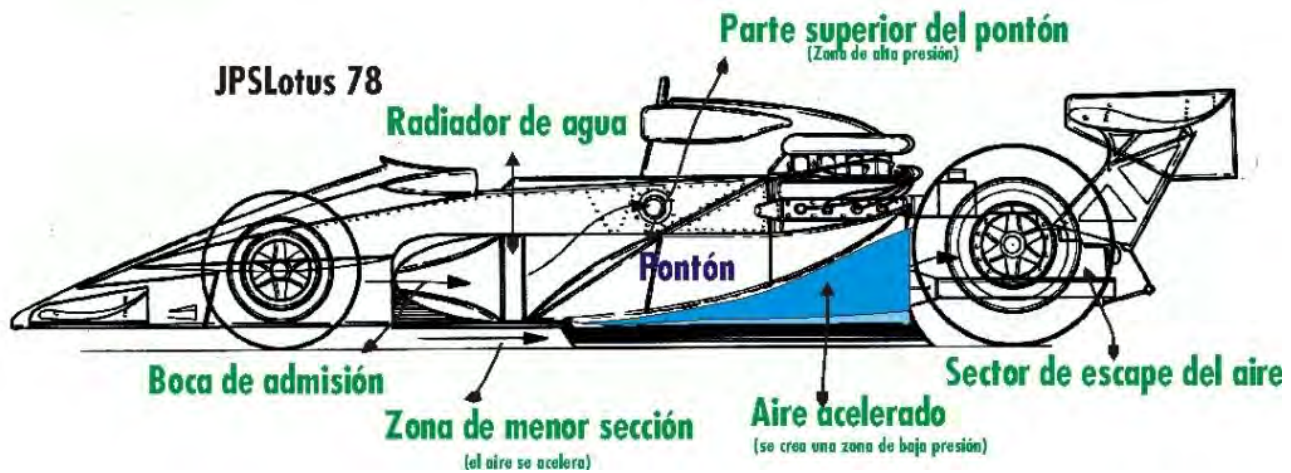


Figura 3.9: Perfil del Lotus 78 [28]

El aire pasaba por la parte inferior del coche, en la zona de menor sección el aire se aceleraba y posteriormente según aumentaba la sección disminuía la velocidad. Creando una disminución de presión en la zona de menor sección, generando el efecto Venturi mencionado anteriormente, que creaba la adherencia al suelo. Pero para obtener esta adherencia sin pérdidas no deseadas de aire, era necesario contar con unas buenas faldillas.

Otra técnica que se desarrolló a través de este descubrimiento, fue el Brabham BT46B (ver Figura 3.10), diseñado por el ingeniero Gordon Murray. Se trataba de un sistema que permitía la extracción del aire debajo del vehículo mediante un ventilador anclado al motor por un engranaje final del cambio. Donde las hélices interiores situadas en dicho ventilador giraban aspirando el aire de la parte inferior del monoplaza, era un sistema simple y sobretodo muy ligero. Al igual que el Lotus 78, éste disponía también de las faldillas laterales, que evitaban filtraciones externas del aire por los laterales.



Figura 3.10: Brabham BT46B, a la vista su ventilador trasero [27]

Con estas tendencias, los vehículos se iban haciendo más largos y anchos, además si a eso le añadimos los nuevos motores turbo, nos hacemos una idea del riesgo que corrían los pilotos.

Muchos de los vehículos comenzaron a prescindir de los alerones delanteros pues la mayor parte de trabajo aerodinámico se ejercía en la parte inferior del monoplaza.

A partir de los años 80 se comenzó a poner en duda la seguridad de estos monoplazas, pero tras numerosos accidentes de los cuales en más de una ocasión se zanjaron en tragedia, la FIA realizó un cambio sustancial en el reglamento técnico, a partir de la temporada 1983 comenzó a estar prohibido el efecto suelo como recurso aerodinámico de la F1.

Tras la prohibición del efecto suelo, los alerones volvieron a ser los protagonistas en los circuitos. En los que pequeños cambios en ellos, marcaban la diferencia. Uno de los ejemplos que me han llamado la atención, es el Lotus 93T, que con unos enormes problemas de adherencia del tren trasero, le instalaron un alerón de cuatro perfiles, conocido como el alerón persiana (ver Figura 3.11), sin mucho acierto, pues el monoplaza abandonó la carrera en la cuarta vuelta por grandes problemas de estabilidad y manejo.



Figura 3.11: Alerón de 4 planos del Lotus 93T [30]

En este mismo año surgieron tres nuevas novedades. En primer lugar la entrada de aire para los radiadores comenzaron a adelantarse cada vez más hacia el morro del monoplaza. Donde también se podía observar en los alerones delanteros, deflectores en sus extremos. Pero uno de los cambios más significativos que a día de hoy se mantiene, evolucionado según las normativas vigentes, son los *“bargeboards”*. Que no son más que unos perfiles verticales situados tras la suspensión delantera y por delante del borde exterior de los pontones. El objetivo de dicho dispositivo era el de dividir el flujo turbulento generado por el eje delantero, en la que una de sus partes se dirige al exterior del monoplaza, y la restante se orienta hacia las tomas de refrigeración de los pontones (ver Figura 3.12).



Figura 3.12: Lotus 94T, con deflectores laterales[34]

Esta solución no tardó en ser copiada por el resto de monoplazas, aunque cayó en desuso a finales de los 80. Sin embargo, a partir del año 1993 de la mano de escuderías como Benetton o McLaren volvieron a aparecer en las parrillas, generalizándose hasta día de hoy.

La década de los 90 comenzó con la implantación de los chasis monocasco de fibra de carbono. Éstos eran mucho más resistentes que los de acero. Proporcionando al habitáculo del piloto una gran resistencia frente a choques, y a su vez protección al fuego. La fibra de carbono, a su vez, es mucho más ligera que el acero, lo que provocó que los vehículos se volvieran más rápidos.

A partir de 1995, debido a la gran cantidad de limitaciones impuestas por la FIA los diseños tenían que ser dibujados a partir de una plantilla de referencia, en la cual se encontraban las estrictas restricciones a cumplir, como era el tamaño de la cabina, que aumentó, el tamaño de los alerones y demás dispositivos aerodinámicos, que se redujeron e introdujeron verificaciones de medidas y rigidez que debía cumplir el vehículo.

En 1996 la FIA obligó a aumentar todavía más el área mínima de la cabina, junto con la implantación de protecciones a la altura de la cabeza, para evitar que estuviera tan expuesta, por el contrario dichas protecciones disminuían la visibilidad del piloto, provocando así un mayor número de accidentes. En la Figura 3.13 podemos observar dichas protecciones a la altura de la cabeza del piloto.



Figura 3.13: Benetton B194 [35]

Otras modificaciones aerodinámicas que se pueden apreciar en la Figura 3.13 es la elevación de la trompa, dejando atrás los morros bajos pegados al alerón, y la aparición de deflectores en el alerón trasero, podemos observar la forma de V inversa que forman en la imagen.

3.2. Evolución de la aerodinámica en el s.XXI

En el monoplaza de Ferrari (ver Figura 3.14) se pueden observar pequeñas modificaciones aerodinámicas que marcaban la diferencia con el resto. Comenzando de parte delantera a trasera del monoplaza, encontramos la nueva curvatura que se le implantó al alerón delantero y la evolución de los deflectores laterales en comparación con los modelos anteriores.



Figura 3.14: Ferrari F2001 del GP de Italia de 2001 [36]

El monoplaza más exitoso de la escudería Ferrari, el Ferrari F2002, (ver Figura 3.15) consiguió 15 grandes premios de los 17 disputados, entre 2002 y 2003. A continuación enumeraremos las diferencias con su antecesor el F2001. En primer lugar se acortaron los soportes del alerón delantero, aumentando también el borde de salida de dicho alerón, ganando en carga aerodinámica en el eje delantero. En el F2002 los deflectores de las ruedas traseras no están unidos a los alerones y estos son más abiertos, suavizando la curvatura de la carrocería. También se alargó la caída del chasis sobrepasando el eje trasero, guiando el aire por encima de los neumáticos, reduciendo así la resistencia aerodinámica generada por los neumáticos traseros.

Este monoplaza hacía evidentes los patrones a seguir en las siguientes 4 temporadas, la de la exageración de las aletas laterales y los deflectores, con el fin de un mejor aprovechamiento del flujo de aire.

En 2005 se volvió a priorizar la aerodinámica. Lo que provocó que el desarrollo de los monoplazas se volviera excesivamente costoso y sumando la crisis económica que se avecinaba obligó la modificación de la normativa, cuyo único objetivo era el abaratamiento del mantenimiento y desarrollo de los vehículos.



Figura 3.15: Ferrari F2002, conducido por Michael Schumacher [37]

En 2007 la escudería McLaren contaba con sus nuevos monoplazas MP4/22 (ver Figura 3.16). En el cual podemos observar nuevas modificaciones aerodinámicas como son, el deflector que pasa por encima del morro en el alerón delantero, así como unos estabilizadores en los pontones y detrás del habitáculo.



Figura 3.16: A la izq. McLaren MP4-22 conducido por F. Alonso, dcha. McLaren MP4-22 conducido por L. Hamilton [38]

Vigente el nuevo reglamento en 2009, aparecen nuevos conceptos y nuevos protagonistas. En los que los monoplazas se observan limpios de deflectores, suspensiones más cortas y por primera vez la introducción de alerones asimétricos en cuanto al tamaño, siendo los delanteros más anchos que en temporadas pasadas y los traseros más estrechos y elevados. Pero donde realmente se aprovechó el vacío de reglamento, fue en la utilización de los difusores traseros, lo que se convirtió en el secreto del éxito de Brawn GP Mercedes. En la Figura 3.17 podemos observar los difusores utilizados por la escudería.

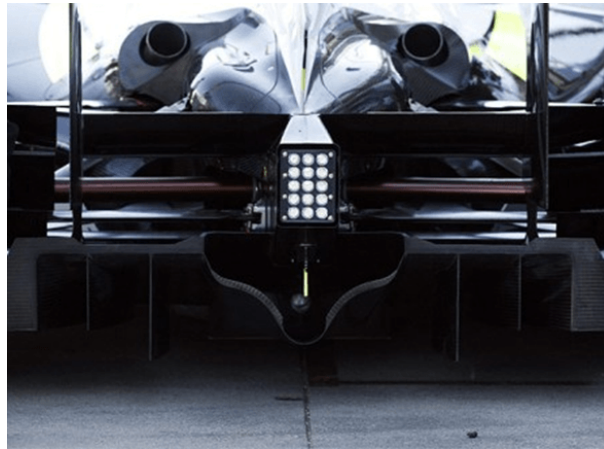


Figura 3.17: Difusores traseros del Brawn GP Mercedes BGP01 [39]

En la temporada 2010 se prohibieron los repostajes durante la carrera, donde los vehículos comenzaban con la gasolina necesaria para terminarla, esto añadió una variación de masa importante que se tuvo en cuenta a la hora del diseño.

Sin ninguna duda fue el Red Bul RB6, ver Figura 3.19, es el que mejor supo adaptarse a dichos cambios, ya que su motor Renault a pesar de no ser de los mejores en cuanto a velocidad punta se refiere, sí que tenía un consumo muy reducido, lo que se convertía en una gran ventaja. Para contrarrestar esa falta de velocidad punta, Adrian Newey, jefe de diseño de RBR, consiguió elaborar un monoplaza con una aerodinámica casi perfecta en la que conseguía un agarre en curvas que les permitía entrar cerca de 20 km/h más rápidos que el resto.

Uno de los dispositivos que dispone este RB6 3.19 es el F-Duct ideado por McLaren.

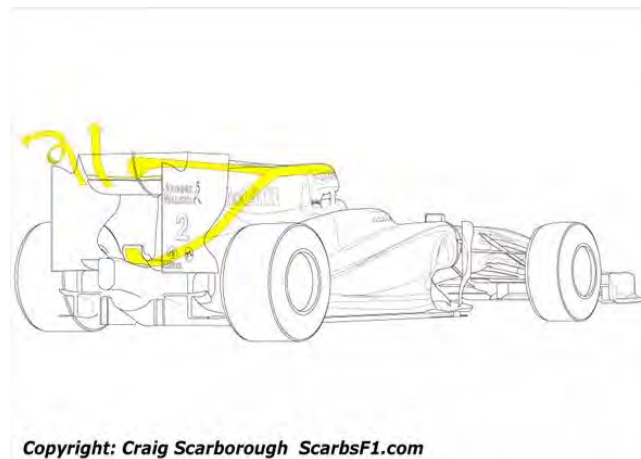


Figura 3.18: Conductos del dispositivo F-Duct [41]

Es una entrada de aire en la nariz del monoplaza que está conectada a través de un conducto que pasa por el “cockpit”, el depósito de combustible, la chimenea y la aleta del tiburón, y cuya función final es soplar aire en el alerón trasero. Con ello conseguimos que el aire que pasa a través del alerón trasero pase de un funcionamiento en régimen laminar, a un funcionamiento en régimen turbulento. La carga aerodinámica máxima se consigue con ese régimen laminar, y eso es muy útil por las curvas del circuito. Sin embargo, con el régimen turbulento perderemos carga aerodinámica, mejorando la velocidad punta del monoplaza, llegando a aportar hasta un promedio de 10 km/h más de velocidad punta. Este dispositivo era activado de forma manual por el piloto.

Otro de los avances determinantes que se le implantó al RB6, fue la de modificar los mapas de motor para contribuir al apoyo generado por el difusor soplado. En los cuales RBR fue el primero que recurrió a dichos dispositivos, lo que le generó una gran ventaja sobre el resto. Donde su doble difusor era menos radical que otros, y este ya contaba con entradas canalizadoras y salidas en forma de arco.



Figura 3.19: Redbull RB6 [42]

El dominio de los Red Bull continúa en el 2010 en el cual el principal protagonista es el sistema de reducción de arrastre o DRS. Sistema que fue introducido con el fin de mejorar el espectáculo, aumentando la cantidad de adelantos. El sistema consiste en la activación de alerones móviles que pueden ser activados sólo en determinadas zonas, generalmente en las rectas, que provocan una menor resistencia al aire, generando una mayor velocidad final. Éste sistema está regido por unas reglas muy estrictas de la FIA, en las cuales se permite el uso del sistema DRS, únicamente por parte del vehículo perseguidor en un adelanto, y cuando éste se encuentre a menos de un segundo de distancia del vehículo delantero, obteniendo una menor resistencia al aire y aumentando la velocidad final.

En 2012, año caracterizado aerodinámicamente hablando por la implantación de los conocidos “*morros de pato*”, llamados así por la gran reducción de altura respecto al suelo que habían sufrido los morros dicha temporada, solución que buscaba la practicidad por encima de la estética, a excepción de los ingenieros de McLaren, los cuales optaron por un morro más escalonado, como vemos en la Figura 3.20.



Figura 3.20: Diferencia en el morro del McLaren MP4-27 y el Ferrari F2012 [43]

En esta temporada los de Mercedes acortaron distancias con los Red Bull, gracias a la implantación del sistema DDRS (Double Drag Reduction System)(ver Figura 3.21). Dicho sistema permitía canalizar el aire no solo al alerón trasero, sino también conducirlo gracias a la superficie del monoplaza, al alerón delantero. Aumentando así la carga aerodinámica en la parte delantera del vehículo. De esta manera se consiguió mejorar la estabilidad de los monoplazas, una gran ventaja a la hora de activar el DRS, ya que la idea principal de éste es disminuir la carga aerodinámica del auto, algo que se lograba solamente en el alerón trasero. La disminución de la carga aerodinámica del monoplaza le permite ir más rápido en rectas, sin embargo tendrá más problemas en curva, problema que se soluciona como hemos mencionado anteriormente con el DDRS (Figura 3.21).



Figura 3.21: Esquema de distribución del flujo de aire con el DDRS [46]

Tras la prohibición por la FIA de los difusores sopladados. El diseñador de Red Bull mejoró la idea del DDRS ideado por Mercedes. Tras la pérdida de los difusores sopladados el monoplaza el desarrollo se focalizó en estabilizar el coche. El invento de Newey (ver Figura 3.22) comienza al activar el DRS, al subir el flap del alerón trasero, quedan expuestos dos orificios, éstos canalizan el aire a través de la pared del alerón, el aire es conducido hasta la base del alerón, donde una parte del mismo sale. Ampliando el efecto del DRS, reduciendo todavía más la resistencia aerodinámica. La parte restante del aire canalizado baja hasta el difusor, aumentando la estabilidad de la parte trasera, y lo que es más importante, aumentando la carga aerodinámica. El dispositivo aumenta la velocidad en el paso por curva, lo que es muy importante en las clasificaciones, donde está permitido el uso del DRS en cualquier momento. Dicho dispositivo consiguió disminuir casi un segundo los cronos de los Red Bull.



Figura 3.22: DDRS ideado por a. Newey [45]

Estos últimos años se han caracterizado por pequeñas modificaciones en cuanto a las tomas de aire, la orientación y disposición de los flaps de los alerones y pequeñas modificaciones en el diseño de los monoplazas.

Para más información, pueden consultar el video en la ref.[40] donde se resume la evolución del diseño aerodinámico en un minuto.

Capítulo 4

Fundamentos básicos de la Aerodinámica:

4.1. Fluidos:

Un fluido es todo cuerpo que tiene la propiedad de fluir, carece de rigidez y elasticidad, y en consecuencia cede inmediatamente a cualquier fuerza que tiende a alterar su forma, adoptando así la forma del recipiente que lo contiene. Los fluidos pueden ser líquidos o gases según la diferente intensidad de las fuerzas de cohesión existentes entre sus moléculas.

En nuestro caso el fluido con el que trabajaremos es el aire, un fluido gaseoso. Para entender el comportamiento de dichos fluidos debemos entender sus propiedades y las leyes por las cuales se rige la aerodinámica.

4.1.1. Mecánica de Fluidos:

Es la rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos, así como las fuerzas que lo provocan. La incapacidad de los fluidos para resistir esfuerzos cortantes es lo que provoca que éstos carezcan de forma definida.

La Mecánica de Fluidos también estudia las interacciones entre el fluido y el contorno que lo limita. Partiendo de unas hipótesis básicas en función de las cuales se desarrollan todos los conceptos, en la mecánica de fluidos asumimos que los fluidos verifican las siguientes leyes:

- **Conservación de la materia:** Elaborada independientemente por Mijaíl Lomonósov en 1748 y por Antoine Lavoisier en 1785. Donde se demuestra que la materia ni se crea ni se destruye, solo se transforma.
- **Conservación de la cantidad de movimiento:** Si la resultante de las fuerzas exteriores que actúan sobre un sistema de partículas es nula, la cantidad de movimiento del sistema permanece constante.[50]
- **Primera ley de la termodinámica:** Determina que la energía interna de un sistema aumenta cuando se le transfiere calor o se realiza un trabajo sobre él. [51]

$$\Delta U = Q + W \quad (4.1)$$

$$\Delta U = Q - W \quad (4.2)$$

- **ΔU :** Incremento de energía interna del sistema ($\Delta U = U_{final} - U_{inicial}$). Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el julio (J)
 - **W :** Trabajo intercambiado por el sistema con el entorno. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el julio (J).
 - **Q :** Calor intercambiado por el sistema con el entorno. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el julio (J), aunque también se suele usar la caloría (cal). $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$.
- **Segunda ley de la termodinámica:** Se expresa en varias formulaciones equivalentes:
- **Enunciado de Kelvin - Planck:**
No es posible un proceso que convierta todo el calor absorbido en trabajo.
 - **Enunciado de Clausius:**
No es posible ningún proceso cuyo único resultado sea la extracción de calor de un cuerpo frío a otro más caliente. [52]

Sin embargo, la hipótesis fundamental en la que se basa toda la mecánica de fluidos es la hipótesis del medio continuo. Esta hipótesis considera que el fluido es continuo a lo largo del espacio que ocupa, despreciando así las discontinuidades asociadas a su estructura molecular. De esta manera podemos considerar funciones continuas, propiedades del fluido como la densidad, la temperatura, etc.

4.1.2. Propiedades de los fluidos:

- **Densidad:**
- Los fluidos están formados por una gran cantidad de moléculas ligadas entre sí, y separadas a diferentes distancias; cuanto más unidas están las moléculas, de mayor densidad es el fluido. Un fluido más denso que otro, es a su vez más pesado, puesto que tiene mayor cantidad de masa, al tener más moléculas.
- Para realizar estas consideraciones debemos de referenciarlo siempre respecto a un volumen. Por tanto, definimos densidad, como la cantidad de moléculas por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.3)$$

- **m**: Masa
- **V**: Volumen

La densidad es un parámetro muy importante, desde el punto de vista termodinámico. Muy útil a la hora de conocer la eficiencia del motor. A mayor densidad, mayor cantidad de moléculas, luego la cantidad de aire es mayor, por tanto la eficiencia del motor aumenta. Por el contrario, en los días cálidos donde la densidad del aire es menor, el motor posee una eficiencia menor.

■ **Presión:**

Relaciona la fuerza con la superficie sobre la que actúa. Cuando actúa sobre una superficie plana de área A una fuerza normal F de manera uniforme y perpendicular a la superficie, la presión P viene dada por:

$$P = \frac{F}{A} \quad (4.4)$$

Si la fuerza puede tener cualquier dirección y puede no estar distribuida uniformemente en cada punto, la presión P se define como:

$$P = \frac{d\vec{F}}{dA} \cdot \vec{n} \quad (4.5)$$

- **P**: Presión
 - **F**: Fuerza
 - **A**: Área
 - **\vec{n}** : Es el vector unitario y normal a la superficie en el punto donde se pretende medir la presión.
-

Existen dos tipos de presiones, la atmosférica y la presión relativa.

La presión atmosférica, es la fuerza (o peso) que hay sobre cierto punto o cuerpo, debida a la cantidad de moléculas de aire que hay sobre dicho punto o cuerpo. De modo que a mayor presión, las moléculas de aire estarán más unidas, por consiguiente su densidad será mayor, de esta forma como hemos mencionado anteriormente a mayor cantidad de aire el motor será más eficiente.

La presión relativa es aquella que no tiene en cuenta la presión atmosférica, y la suma de ambas se denomina presión absoluta. La presión relativa, es la causada por la propia dinámica del aire, y es básica, para poder diseñar un coche de competición.

- **Viscosidad:**

La viscosidad es la resistencia que posee todo fluido a deformarse por la acción de una fuerza cualquiera. Es una propiedad dinámica; solo se hace presente y se puede cuantificar cuando existe movimiento.

Es la propiedad más importante del aire, ya que sin su existencia no existiría ningún fenómeno dinámico. Es la responsable directa de la existencia de la capa límite, que sin ella no existirían las fuerzas aerodinámicas.

4.2. Principios de la aerodinámica:

Vistas las propiedades más importantes del aire, hemos de pasar a las leyes o principios que rigen toda dinámica o evolución temporal.

4.2.1. Principio de Bernoulli:

El principio de Bernoulli, describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Expuesto por Daniel Bernoulli en 1738, expresa que la energía de un fluido ideal, sin viscosidad ni rozamiento, en régimen de circulación por un conducto cerrado, permanece constante a lo largo del recorrido. La energía de un fluido se divide en tres tipos de energías:

- **Energía cinética:** Es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.
 - **Potencial gravitatoria:** Es la energía debida a la altitud que posea el fluido.
 - **Energía de flujo:** Es la energía que contiene un fluido debido a la presión.
-

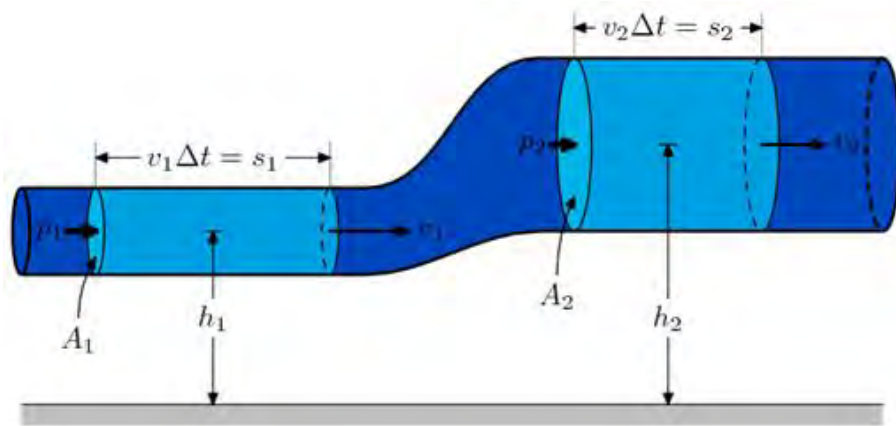


Figura 4.1: Esquema del Principio de Bernoulli [53]

La ecuación o principio de Bernoulli consta de los siguientes términos:

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constante} \quad (4.6)$$

- **V**: Velocidad del fluido en la sección considerada.
- **ρ** : Densidad del fluido.
- **P**: Presión estática.
- **z**: Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

Para aplicar la ecuación se deben realizar los siguientes supuestos:

En primer lugar, como hemos mencionado anteriormente, se debe considerar el fluido como ideal, es decir la viscosidad sea considerada como nula. El caudal constante y el flujo incomprensible, donde ρ es constante.

La ecuación se aplica a lo largo de una línea de corriente. De esta manera si la presión aumenta, la velocidad ha de disminuir y viceversa.

4.2.2. Efecto Venturi:

El efecto Venturi, es un caso particular de la famosa ecuación de Bernoulli, descubierta por el físico italiano Giovanni Venturi. Demuestra que al variar la sección del tubo, varía la presión del fluido de manera proporcional a la variación de sección.

En un tubo donde fluye aire, con un cambio de sección, por ejemplo, de mayor a menor, la cantidad de aire que entra ha de ser la misma que la que sale, con lo que por la sección mayor, la velocidad del aire será menor que la velocidad del mismo aire pasando por la sección menor. Es decir, al aumentar la velocidad, disminuye la presión y viceversa.

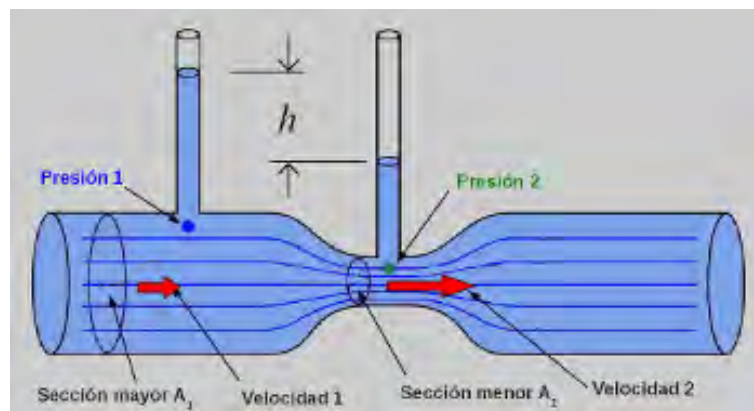


Figura 4.2: Esquema del tubo de Venturi [54]

El tubo de Venturi es el que se puede ver en la figura 4.2, consiste en un tubo formado por dos secciones cónicas unidas por un tubo estrecho, por el cual como hemos demostrado anteriormente el fluido se desplaza a mayor velocidad. Podemos medir la presión en el tubo de Venturi a partir de los tubos verticales posicionados en la diferentes secciones del tubo. A partir de la diferencia de altura del fluido en los dos tubos verticales podemos calcular la presión en ambos puntos y consecuentemente la velocidad.



Figura 4.3: Efecto Venturi adaptado a un F1 [65].

Para comprender la relación de esta teoría con el mundo del automovilismo debemos aplicar los anteriores principios a la sección de un ala, como podemos observar en la figura 4.4 a continuación.

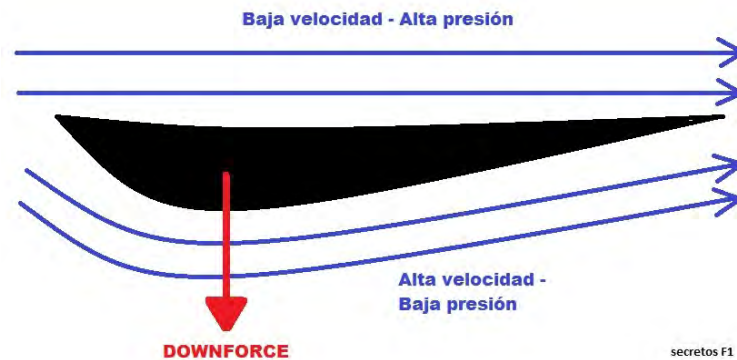


Figura 4.4: Sección alerón [55]

En la zona inferior del ala, como observamos en la figura 4.4 el recorrido del aire es mayor que el superior, luego la velocidad de dicho aire debe ser mayor. Conociendo que al aumentar la velocidad disminuye la presión, podemos afirmar que la presión en la zona inferior es menor a la superior, creando una presión resultante en dirección al suelo, nombrada en la figura 4.4 como Downforce.

4.2.3. Efecto Coanda:

El efecto Coanda es un fenómeno físico en el cual una corriente de fluido, ya sea líquida o gaseosa, tiende a ser atraída por una superficie vecina a su trayectoria. Para comprender de una manera más sencilla el efecto Coanda partiremos de un ejemplo a partir de la figura 4.5.

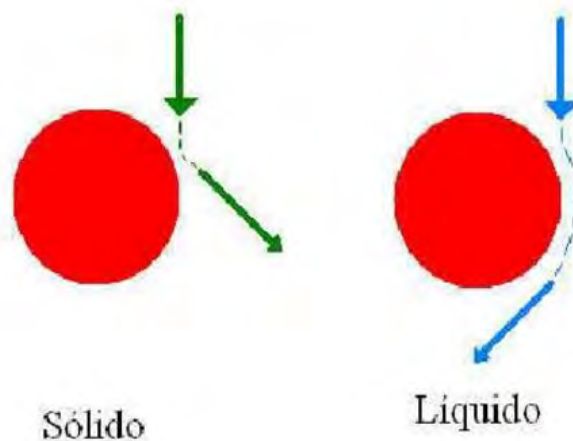


Figura 4.5: Esquema Efecto Coanda [56]

Si sobre un cilindro vertimos algo sólido, éste rebotará hacia la derecha y el cilindro por el principio de acción-reacción tenderá a desplazarse hacia la izquierda. Sin embargo, si repetimos la misma acción pero esta vez con un líquido, como puede ser el agua, debido a su viscosidad, éste tenderá a pegarse a la superficie curva. Si en este caso nos imaginamos el agua como un conjunto de varias capas, la capa que toque el cilindro se quedará pegada. Las contiguas por acción del rozamiento se pegarán a ésta desviándose cada vez más.

El efecto Coanda es extremadamente importante y decisivo en todo diseño, pues nos permite canalizar el aire allí donde queramos o necesitemos. Sin necesidad de deflectarlo de una manera brusca mediante elementos aerodinámicos con la resistencia aerodinámica que ello conlleva.

4.2.4. Resistencia Aerodinámica o “*Drag*”

La resistencia aerodinámica o drag, es la combinación de los efectos anteriores sobre un objeto a través de cualquier fluido, es decir, es la fuerza opuesta al movimiento que sufre en nuestro caso un monoplaza a través del aire.

La cantidad de resistencia aerodinámica dependerá de:

$$R_a = \frac{\rho_a \cdot A_f \cdot C_x \cdot V^2}{2} \quad (4.7)$$

- **Densidad del aire:** “ ρ_a ”. La densidad del aire es aproximadamente constante y no la podemos variar con el diseño del monoplaza.
- **Sección frontal:** “ A_f ”. La superficie frontal, es el área que ocupa el monoplaza visto perfectamente de frente. En esta superficie incluimos neumáticos, espejos y todo lo que se encuentre expuesto al aire en el sentido de la marcha. Esta sección frontal es la que va barriendo un volumen de aire por unidad de tiempo cuando el vehículo se encuentra en movimiento, definiendo la masa de aire que deberá apartar. De esta manera cuanto más aire se deba mover, mayor trabajo implicará hacerlo. Observando la ecuación 4.8 comprobamos que al aumentar el valor de A_f aumenta el valor de la resistencia aerodinámica.
- **Coefficiente de Resistencia Aerodinámica:** “ C_x ”. El coeficiente de resistencia aerodinámica es un número adimensional que viene determinado principalmente por la forma del vehículo. Siendo la parte trasera y la forma en la que el aire rellena el vacío que deja tras de sí, la parte más importante. Como se puede observar cuanto más suaves sean las curvas que tenga que trazar el flujo de aire para rodear el coche menor será el

coeficiente de resistencia aerodinámica, como se puede observar en la figura 4.6. Los ángulos pronunciados, las traseras truncadas (verticales y planas) y en general cualquier perfil no suave hará aumentar el coeficiente de resistencia aerodinámica.

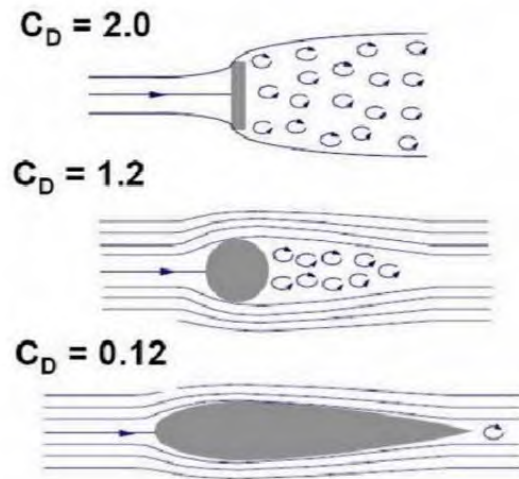


Figura 4.6: Coeficientes de resistencia aerodinámicos [58]

- **Velocidad:** " V^2 ". La resistencia aerodinámica es proporcional al cuadrado de la velocidad, el doble velocidad implica cuatro veces más resistencia.



Figura 4.7: Formula 1 testado en tunel de viento. [59]

Como ha quedado demostrado la resistencia aerodinámica juega un papel fundamental en la eficiencia del vehículo de modo que es un factor muy importante a la hora de diseñar un monoplaza.

4.2.5. Carga Aerodinámica o “*Lift*”

La carga aerodinámica (en F1 se corresponde con la sustentación en valor negativo), se define como la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, y que es en dirección perpendicular a la velocidad de la corriente incidente (en F1 dirección al suelo).

Al igual que la resistencia aerodinámica, la carga aerodinámica dependerá de:

$$C_a = \frac{\rho_a \cdot A_f \cdot C_l \cdot V^2}{2} \quad (4.8)$$

- Densidad del aire: “ ρ_a ”.
- Sección frontal: “ A_f ”.
- Coeficiente de Carga Aerodinámica: “ C_l ”.
- Velocidad: “ V^2 ”.

En la F1, el comportamiento de los neumáticos está directamente relacionado con la aerodinámica del monoplaça, ésta permite mejorar las prestaciones del mismo en frenadas y curvas a alta velocidad. A continuación mostramos una gráfica que nos relaciona la fuerza lateral y vertical para un neumático en función del ángulo de deriva, ver Figura 4.9.

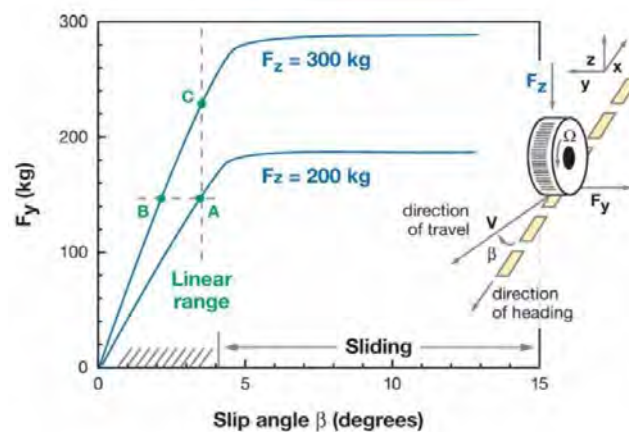


Figura 4.8: Relación entre fuerza lateral y vertical para un neumático en función del ángulo de deriva. [88]

Al girar el volante para trazar una curva, se induce el neumático a un ángulo de deriva. Mayores ángulos de deriva se corresponden con una fuerza lateral mayor, debido a que una mayor flexión requiere una mayor fuerza.

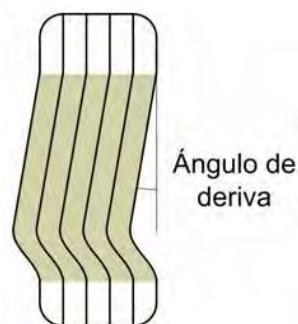


Figura 4.9: Ángulo de deriva. [87]

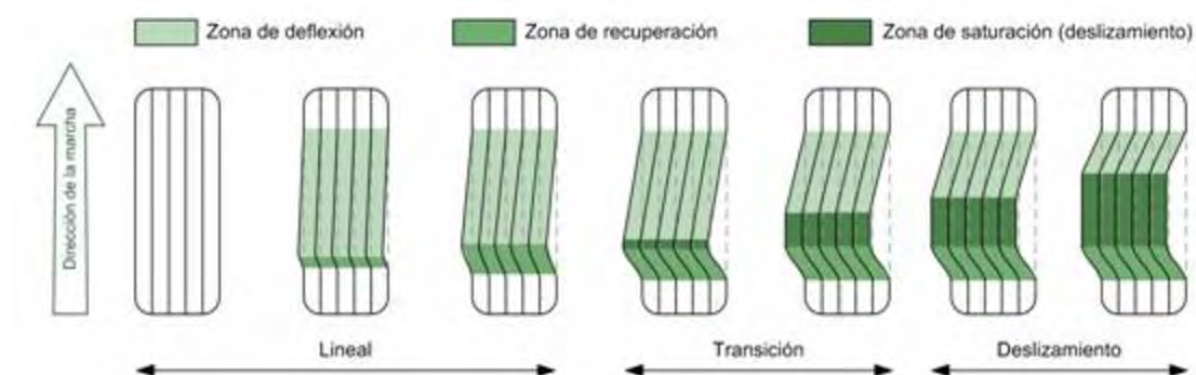


Figura 4.10: Consecuencias de evolución del ángulo de deriva. [87]

Como se puede apreciar en la Figura 4.10, a cierto ángulo de deriva, parte considerable del neumático se encuentra saturado como para que éste sea incapaz de generar más fuerza lateral. El ángulo de deriva en el que el neumático alcanza dicho máximo varía en función de las fuerzas verticales que el monoplaça recibe, como se aprecia en el Gráfico 4.8.

La fuerza vertical ejercida sobre un neumático, repercute de manera directa en la cantidad de fuerza lateral que éste consigue generar, y varía linealmente con el ángulo de deriva, como se observa en el Gráfico 4.8.

En la gráfica se puede observar como a un mismo ángulo de deriva, aquel neumático con mayor fuerza vertical, es capaz de generar una mayor cantidad de fuerza lateral. O bien, al aumentar la carga vertical, es necesario un menor ángulo de deriva para conseguir una fuerza lateral determinada.

Como se ha comprobado, la carga aerodinámica tiene un papel principal en el rendimiento de un monoplaza en pista, permitiendo tomar las curvas más rápido sin llegar a los límites de adherencia y que se consiga un menor desgaste de neumático, debido al menor ángulo de deriva requerido.

Aerodinámica de un Formula Student:

En el siguiente capítulo se explicarán los diferentes elementos aerodinámicos que intervienen en mayor o menor medida en un monoplaza de Formula Student.



Figura 5.1: Michigan FSAE 2013 [60]

5.1. Los alerones:

El alerón, es un cuerpo con tal forma que el aire pasa a través de él creando carga aerodinámica, sin causar excesiva resistencia. Como podemos observar en la Figura 3.4 es la parte inferior del alerón aquella con mayor superficie para así reducir la presión.

Puede tener varias secciones a lo largo de él. El borde de ataque o BA, es la parte delantera del alerón y suele tener una forma radial. El borde de fuga o BF se encuentra en la zona opuesta del alerón y es la zona estrecha del mismo. A la línea recta que une el BA y el BF se le llama línea de cuerda, y la distancia a lo largo de esta línea se le llama dimensión de cuerda. El grosor del alerón se expresa como un porcentaje o fracción decimal de la dimensión de la cuerda.

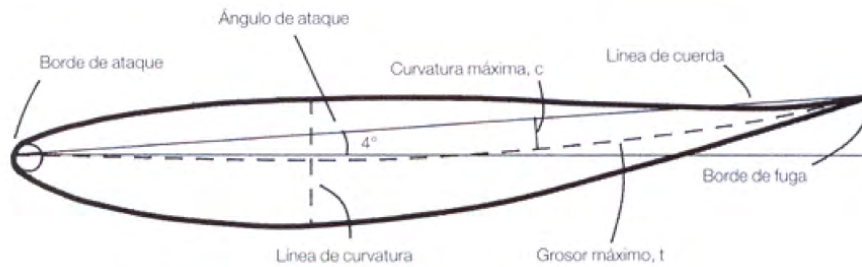


Figura 5.2: Perfil de un alerón [61].

En el caso de los alerones de los monoplaza de competición son asimétricos, se dice que tienen curvatura, lo que significa que su superficie inferior está más curvada que la superior. Pero no siempre fue así, los primeros coches de competición poseían alerones prácticamente simétricos.

El ángulo de ataque o ángulo de incidencia de un alerón, es el ángulo entre el flujo de aire y la línea de cuerda. Este ángulo de incidencia puede variar debido a que el flujo del aire no siempre es paralelo al suelo; esto puede ser cierto en algunas ocasiones para los alerones delanteros, pero casi nunca para los traseros. Este ángulo no puede ser variable en los coches de competición cuando se encuentren en marcha, sin embargo, sí que pueden ser variados en boxes. Elevados ángulos de ataque pueden provocar que el flujo aerodinámico se desprenda de la zona inferior del alerón demasiado pronto al no ser capaz de seguir un contorno tan acusado, como se observa en la Figura 5.3. Ésto provocaría una pérdida de carga aerodinámica y un aumento de “*Drag*”.

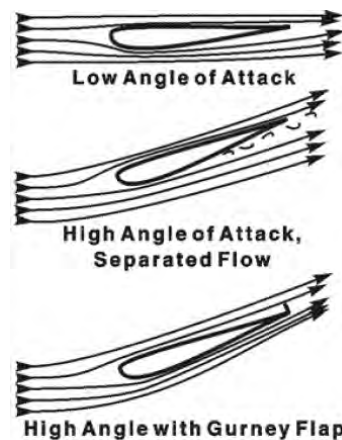


Figura 5.3: Experiencia de diferentes ángulos de ataque [62].

Para solventar la separación de la capa límite, podemos implementar el flap Gurney. El flap Gurney es una tira de aluminio o fibra de carbono que colocamos en el BF del alerón. Ésto provoca una mejoría en el rendimiento del alerón de hasta un 25 % de carga aerodinámica adicional a costa de sacrificar una pequeña cantidad de drag y por consecuencia de velocidad punta. Esto se produce debido a que crean un par de vórtices invertidos justo detrás de ellos, los cuales tienen el efecto de añadir una componente vertical a la velocidad del borde de fuga. Haciendo como se observa en la Figura 5.3 que el flujo de aire se desvíe hacia arriba. El uso habitual del flap Gurney viene dado en los alerones, pero actualmente su uso se ha generalizado, llegando a implementarse incluso en los difusores, lo que ha hecho que estos flaps se conviertan en uno de los grandes avances de la historia de la F1.

Los alerones de los coches de competición pueden tener, un solo elemento, dos elementos o múltiples elementos, dependiendo de las configuraciones que permita el reglamento, así como las necesidades impuestas por cada circuito.

■ **Alerones de un solo elemento:**

Los principios básicos para la creación de carga aerodinámica, como hemos definido anteriormente, parten de que a mayor ángulo de ataque creamos mayor nivel de carga aerodinámica, hasta el punto o ángulo conocido como de pérdida, en el que el flujo de aire se despega del perfil creando turbulencia. Un alerón simétrico de un solo elemento, no produce carga aerodinámica si tiene un ángulo de incidencia cero, pero la carga aumenta de una manera casi lineal con el incremento del ángulo, hasta alcanzar aproximadamente los 14-16 grados. Como podemos observar en la Figura 5.4 a continuación.

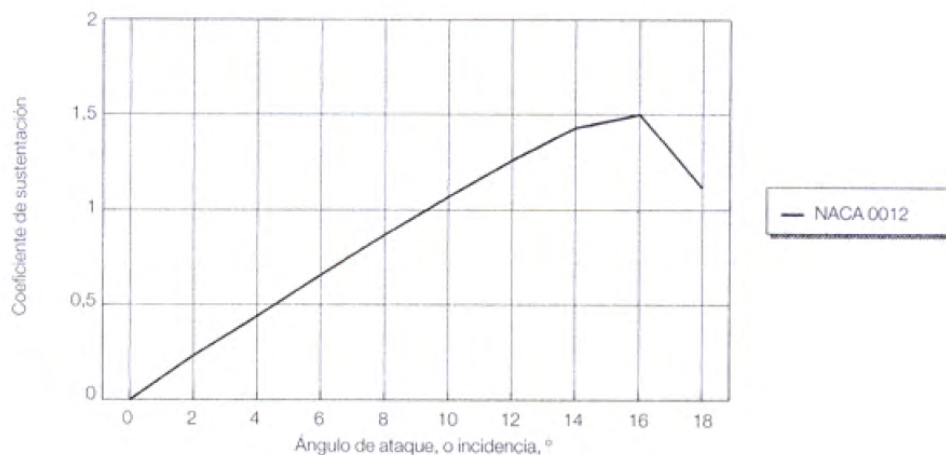


Figura 5.4: Sustentación contra ángulo de incidencia en perfil NACA 0012 [61]

- **Alerones de dos elementos:**

Si necesitamos una cantidad mayor de carga aerodinámica y podemos tolerar la consiguiente resistencia adicional, entonces debemos utilizar alerones más complejos.

El diseño de alerón de varios elementos más sencillo, es el alerón de dos elementos, donde el plano principal va acompañado de un flap. Con la implementación del flap, aumentamos el área de planta, que como hemos visto permite la creación de más carga aerodinámica. También aumentamos la curvatura efectiva del alerón, aumentando así la carga aerodinámica a cierto ángulo de ataque.

La dimensión del flap debe de ser en torno al 25-30 % de la longitud de la cuerda.

La consideración más importante con un alerón de dos elementos, es la posición del flap en relación con el plano principal. Se debe de formar una ranura estrecha entre el BF del plano principal y el BA del flap. Para esto es necesario que se solapen, situándose el flap por encima del plano principal. El tamaño de la ranura creada debe estar en torno al 1-2 % de la longitud de cuerda. Esta ranura debe tener forma convergente, es decir, se va estrechando desde su apertura hasta la salida.

Al montar un flap ocurren al mismo tiempo una serie de fenómenos. El flap induce a que la velocidad del aire aumente sobre las zonas de succión y de presión del elemento principal, evitando la separación del flujo. Combinando el área adicional obtenida por la implementación del flap, el incremento de la curvatura y la beneficiosa modificación del flujo alrededor del plano principal sirven para conseguir un aumento significativo de la carga aerodinámica.

- **Alerones de varios elementos:**

Con los alerones de varios elementos podemos obtener valores del coeficiente de sustentación mayores. Colocando dos flaps sobre el BF del plano principal, obtenemos una extensión de la configuración de un solo flap, y conseguimos aumentar la curvatura del ala incluso más. En el mundo del automovilismo en diferencia al aeronáutico, se emplean dos flaps similares si no idénticos. El tamaño de la ranura entre el plano principal y el primer flap y entre éste y el segundo, puede ser similar, de no ser así, el primero debe ser mayor que el segundo.

El ángulo de inclinación de los *flaps* ronda de entre los 25 a 30° para el flap delantero y entre los 30 y 70° para el secundario, midiendo los ángulos en relación con la cuerda del plano principal.

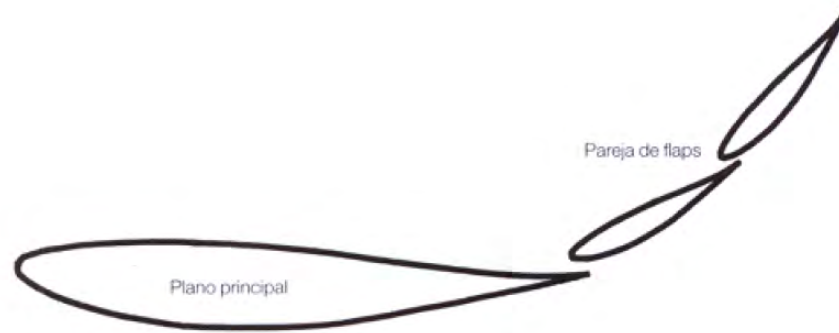


Figura 4.10. Un alerón de tres elementos.

Figura 5.5: Configuración de los flaps en alerón de tres elementos [61].

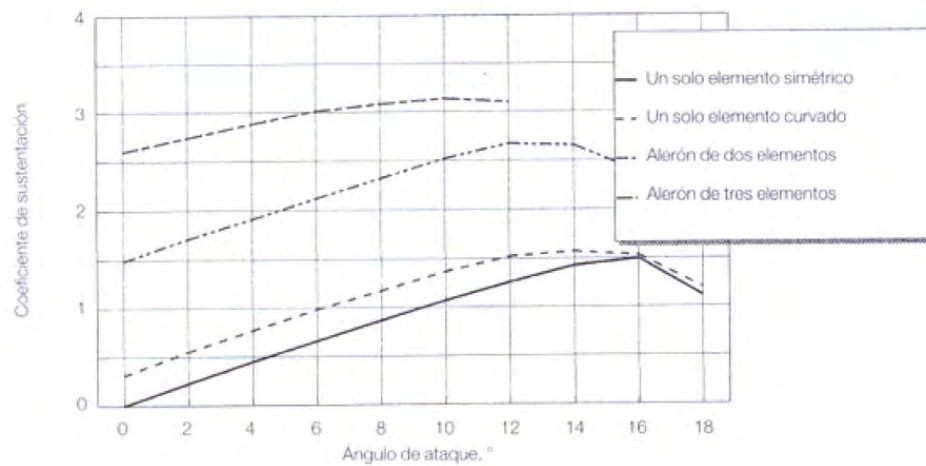


Figura 5.6: Curva de sustentación de un alerón de tres elementos [61].

- **Elementos secundarios: Derivas laterales:**

La función de las derivas laterales no es tan sólo la de esconder el perfil del alerón a la competencia, o servir de espacio para colocar la pegatina de los patrocinadores, éstas tienen una función importantísima en la aerodinámica. Contribuyen a aumentar hasta un 30 % la carga aerodinámica que se lograría sin ellas. En el caso de no contar con las derivas laterales, la diferencia de presión de aire entre la parte superior y inferior del alerón hace que el aire de la zona de alta presión intente escapar a la zona de baja presión, a partir de movimientos diagonales que se derraman por la zona lateral del alerón. Causando una gran pérdida de carga aerodinámica. Incorporando las derivas laterales evitamos este tipo de movimientos, como podemos observar en la Figura 5.6. que se muestra a continuación. Ayudándonos a mantener la diferencia de presión entre ambas zonas.

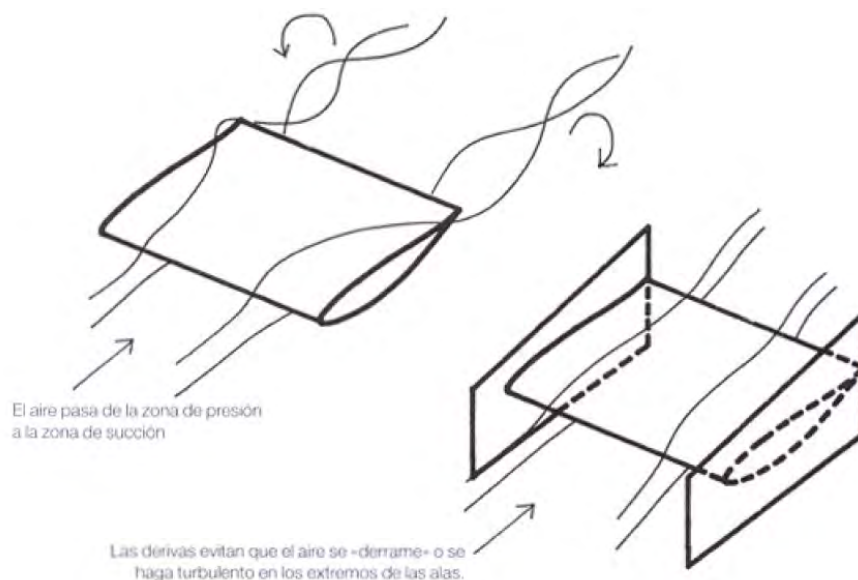


Figura 5.7: Efecto de las derivas laterales [61].

5.1.1. El alerón delantero:

El alerón delantero es el primer elemento del coche en contactar con el flujo de aire. El flujo alrededor de éste incide con menos perturbación que en cualquier otro elemento aerodinámico. La función del alerón delantero a parte de crear *downforce* o carga aerodinámica, es la de redirigir el flujo de aire a lo largo del monoplaza de la manera más ordenada posible. Los *flaps* y los *winglets* (pequeños apéndices aerodinámicos) se usan para guiar el aire pasadas las ruedas hacia las entradas del radiador y la zona inferior del vehículo. Cada una de las aristas que posee el monoplaza provoca una turbulencia, al igual que las suspensiones y más aún si mencionamos las ruedas o el alerón trasero. A continuación en la Figura 5.7 se puede observar la creación de turbulencias a lo largo del vehículo.

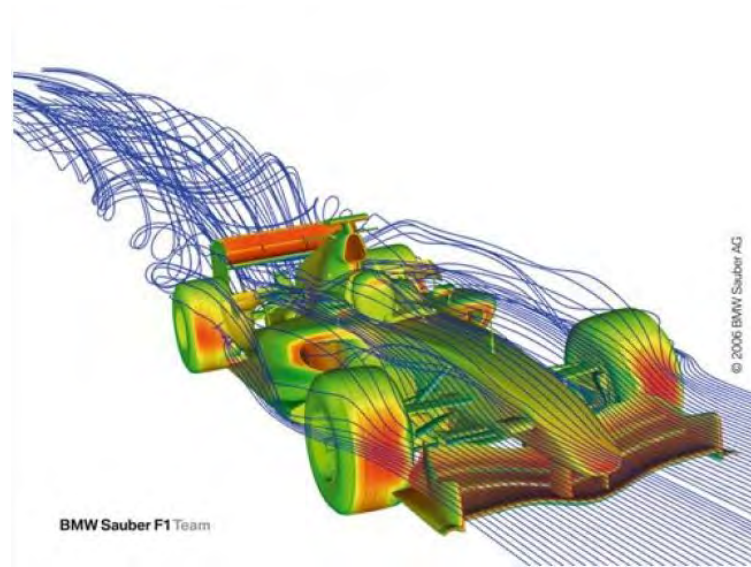


Figura 5.8: Simulación por ordenador de BMW Sauber [62].

El alerón delantero carga con el 33% del *downforce* del coche. Otra función del alerón delantero es la de dirigir aire a la zona donde se encuentran los frenos, mejorando así su refrigeración.

5.1.2. El alerón trasero:

La configuración del alerón trasero se determina según el tipo de circuito en el que se compita (de una manera incluso más crítica que en el caso del alerón delantero).

Existen tres tipos de configuración diferentes en el reglamento técnico de la Formula 1:

- Baja *downforce*
- Estándar *downforce*
- Alta *downforce*

El objetivo del alerón trasero es el de conseguir una óptima relación entre el *downforce* y la resistencia. El alerón de baja *downforce* se utiliza en circuitos rápidos y es el más pequeño de todos, ya que solo consta de un ala casi plana, produciendo una mínima resistencia aerodinámica. Por otra parte, el alerón de *downforce* estándar se utiliza en circuitos mixtos y están constituidos por dos alas, produciendo algo más de *downforce* y resistencia aerodinámica que el anterior. Finalmente en alerón de alta *downforce* llega a estar constituido hasta con tres álabes en forma de cascada, se usa en circuitos lentos debido a que se maximiza la resistencia aerodinámica, afectando a la velocidad punta del monoplaza, pero este alerón es capaz de

producir una fuerza de hasta 13.000 N provocando una mejora considerable en agarre en curvas.



(a) Alerón para circuitos rápidos [63]

(b) Alerón para circuitos lentos [63]

Figura 5.9: Comparación entre alerones en función del circuito

Como hemos mencionado anteriormente el flujo de aire que se mueve hacia la parte posterior del coche se encuentra cada vez más turbulento, lo que provoca que la eficiencia del alerón trasero disminuya respecto al delantero. El alerón trasero junto a las ruedas son los elementos que mayor resistencia aerodinámica generan en el monoplaza.

5.2. La carrocería:

Al igual que el resto de elementos aerodinámicos del monoplaza, la carrocería también está diseñada para generar el máximo *downforce* y la menor resistencia aerodinámica posible. La parte superior del coche está diseñada para conducir el flujo de aire lo más suavemente posible. Por otra parte, la zona inferior, está diseñada para crear una zona de baja presión entre coche y asfalto empujando el coche hacia el suelo.

Anteriormente, el diseño de los monoplazas en su parte inferior se asemejaba a un perfil aerodinámico invertido. Dicha superficie proporcionaba un efecto venturi y unido al efecto generado por los alerones bautizaron lo que fue conocido como “efecto suelo”. Como hemos comentado ya en capítulos anteriores dicho efecto fue prohibido dada su elevada peligrosidad, dando impulso al fondo plano en los monoplazas.

5.3. Fondo Plano:

La configuración más sencilla en lo referente al fondo, sería la de un fondo plano y sin cavidades, de este modo, la distancia al suelo resulta tan crítica como la forma del fondo. De cierta manera los términos “plano” y “forma”, pueden parecer contradictorios, pero existe una manera muy sencilla de conseguir dar “forma” al fondo plano, y es inclinándolo. El objetivo es conseguir un ángulo de incidencia negativo respecto a la horizontal, conocido también como inclinación.

El fondo del coche se ha convertido en una sección Venturi, un cuello estrecho sobre la superficie delantera, a través del cual el aire se acelera, creando una zona de baja presión. Mientras que el resto del fondo se ha convertido en un largo difusor, que al ser plano permite que al aire fluya rápidamente.

Existen diferentes métodos para conseguir que circule la menor cantidad de aire posible por debajo del coche:

- Situar vórtices en el alerón delantero, de tal manera que desvíen el aire de la zona inferior del coche. A su vez dichos vórtices pueden generar pequeñas turbulencias, que provocadas de una manera inteligente por los diseñadores, sirven para extraer aire de debajo del vehículo.
- Apéndices colocados debajo de la abertura de los pontones, que de la misma manera que en el alerón delantero, desvían el flujo de aire de la parte baja del monoplaza.
- Labios en los extremos de la superficie del fondo plano, éstos redirigen el flujo de aire que viene rebotado de las paredes de la carrocería, desviándolo hacia arriba, lejos de la parte inferior.

5.4. El Difusor:

El difusor forma parte del fondo plano, generalmente comienza a partir del eje trasero, incorpora un incremento en el ángulo de desviación comparado con la parte delantera de dicho fondo.

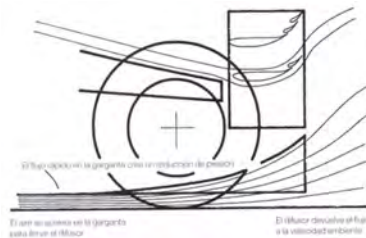


Figura 5.10: Flujo generado a través del difusor [61].

Gran parte del *downforce* se obtiene del difusor, éste posee una geometría que optimiza la transición entre el flujo de alta velocidad de debajo del monoplaça con el flujo mucho más lento de la parte superior, contrastando también sus presiones, la baja presión del inferior con la presión atmosférica.

A su vez proporciona un espacio para el flujo que circula por debajo, permitiendo su desaceleración y expansión, reduciendo así la turbulencia generada por la colisión entre ambos flujos.

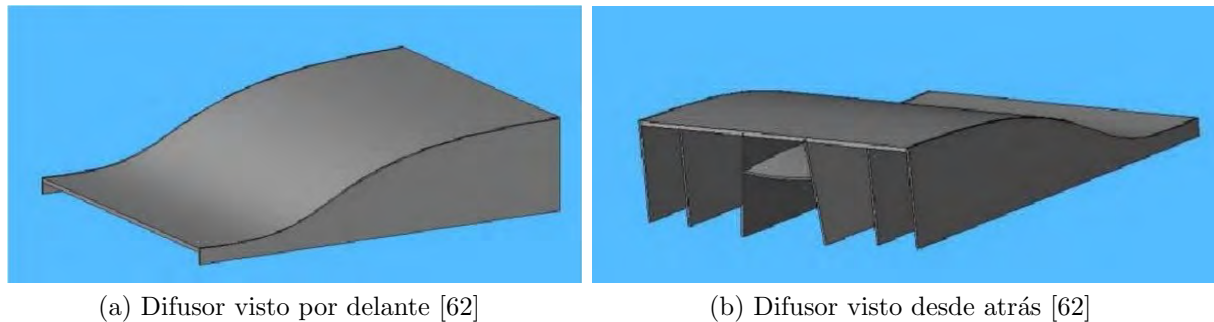


Figura 5.11: Diferentes vistas de un difusor

En la Figura 5.11b podemos observar como unas paredes verticales dividen el difusor, dichas paredes se llaman “desviadores”, éstos separan el flujo en función de su proveniencia para facilitar su gestión. Mientras que las paredes laterales del difusor evitan que el flujo de aire de la zona superior entre en contacto con la inferior y viceversa.

El difusor no actúa de manera independiente al resto de elementos aerodinámicos. Si el alerón delantero no trabaja correctamente en su función de distribuir el flujo, es muy probable que el difusor tampoco lo haga, creando un comportamiento del vehículo inestable e difícil de predecir.

5.4.1. Doble difusor:

El doble difusor consigue extraer más aire, de manera que aumenta la velocidad del aire por debajo del coche, disminuyendo todavía más la presión que los difusores corrientes. Consiguiendo un aumento de *downforce*, permitiendo un mayor agarre por consiguiendo un mejor paso por curva.

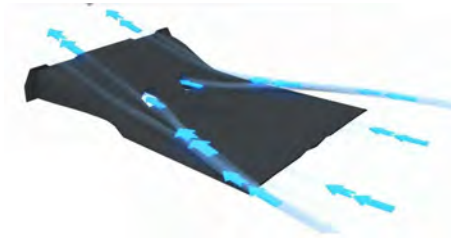


Figura 5.12: Doble difusor [65].

5.4.2. Difusor soplado:

El funcionamiento consiste en dirigir el chorro de los gases de escape al difusor. Para ello se modificó la posición del escape, pasando de la parte superior del monoplaza a la inferior. Gracias a los principios del efecto coanda, anteriormente descritos, conseguimos dirigir dichos gases a través de las superficies del monoplaza hasta el difusor.

Debido a la temperatura y velocidad de estos gases, se consigue aumentar la capacidad de succión del difusor y a su vez la velocidad del aire por debajo del monoplaza. De igual manera que en los casos anteriores, al aumentar la velocidad del aire disminuimos la presión y por consiguiente aumentamos el *downforce*.

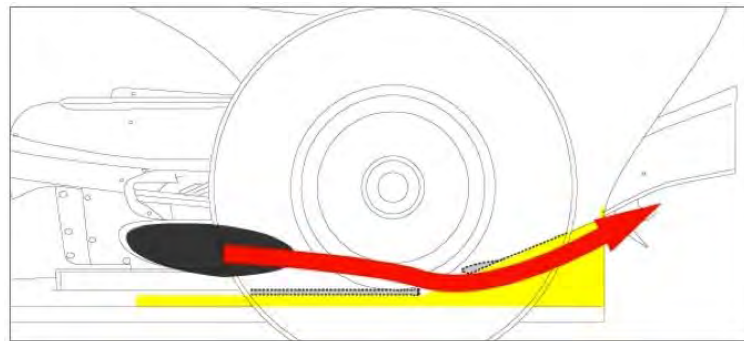


Figura 5.13: Flujo de aire del escape al difusor [66].

El rendimiento de este sistema no es constante, si no que depende de la cantidad de gases que se inyecten al difusor, por tanto, cuanto mayores sean las revoluciones del motor, más cantidad de gases saldrá por el escape, dando un mayor beneficio en términos de carga aerodinámica. De esta manera obtendremos una gran ventaja en las rectas y curvas rápidas, donde el piloto tiene el acelerador pisado a fondo.

El beneficio conseguido en dichos tramos no fue suficiente, por lo que quisieron dar otro paso más, conseguir el mismo efecto en el resto del circuito, es decir, en las curvas lentas e incluso en las frenadas. De esta manera el tubo de escape debería de continuar soplando gases, sin producir potencia. Consiguiendo una expulsión de los gases de escape continuada, permitía que el piloto pudiera dejar de pisar el acelerador y pisar el freno para tomar las

curvas adecuadamente. Para realizar este efecto existen dos maneras diferentes de soplados:

- **Soplado frío:** Consiste en abrir el acelerador del motor por completo cuando el piloto deja de pisar el acelerador. No se inyecta combustible al motor y por lo tanto no se produce potencia. Al no producirse combustión, el aire que sale por los escapes, es “frío”, de hay su utilización por algunos equipos en la refrigeración de las válvulas del motor.
- **Soplado caliente:** Éste también consiste en la apertura del acelerador del motor por completo cuando el piloto deja de pisar el acelerador. La diferencia es que durante este proceso, se continua inyectando combustible. De modo que, es necesario modificar los parámetros del motor y retrasar el encendido para evitar producir potencia. La parte negativa de este método de soplado es el aumento en el consumo de combustible y la enorme fatiga que sufre el motor, ya que no hay tiempo sin combustión.

5.5. Los Pontones:

Los pontones son la parte ancha y baja de la carrocería, se extienden desde cada lado del habitáculo del piloto hasta el extremo final de los radiadores, sin cubrir las tomas de aire pero sí el cuerpo del radiador. El pontón se va estrechando hacia la zona central trasera, en forma de “cuello de botella”. Esta forma no es casual, ya que se basa en la “Regla del área”. Esta regla de diseño aeronáutico sirve para reducir la resistencia de onda producida en el avance de un cuerpo a través de un fluido, sobre todo en altas velocidades. Se consigue reduciendo las variaciones bruscas de sección transversal del vehículo.



Figura 5.14: Pontón del monoplaza de la Universidad de Zürich. [67].

En los pontones como se puede observar en la Figura 5.14 se encuentran las salidas de escape. También podemos observar otros dispositivos aerodinámicos como las aletas del pontón, que a continuación detallaremos y las llamadas “branquias de refrigeración”. Esta serie de branquias en los laterales de los pontones, no solo sirven para refrigerar la zona del pontón, sino que también se utilizan para introducir aire a la zona superior del difusor. En la Figura 5.14 podemos observar dichas “branquias”.



Figura 5.15: Branquias situadas en el pontón de un Mercedes [63].

A pesar de la zona tan amplia que disponen los pontones donde situar dispositivos aerodinámicos sobre ellos para aumentar la cantidad de empuje vertical, resulta que ésto no es necesario, ya que precisamente esta zona es la de mayor peso, ya que se encuentran elementos como la transmisión, la refrigeración, el sistema de escape...

En lugar de esto es preferible mejorar las siguientes prestaciones:

- La canalización del aire a la entrada de los radiadores.
- Dirigir el flujo de aire de tal manera que intentemos evitar en la mayor medida posible la incidencia con las ruedas traseras.
- Dirigir el flujo de aire para que incida mejor en el alerón trasero.
- La evacuación de aire caliente proveniente de los radiadores.
- Generación de empuje vertical.

Para ello se utiliza una serie de elementos aerodinámicos llamados “Aletas de pontón”.

5.5.1. Aletas del pontón:

Existen diferentes tipos de aletas, explicaremos algunas de ellas a continuación:

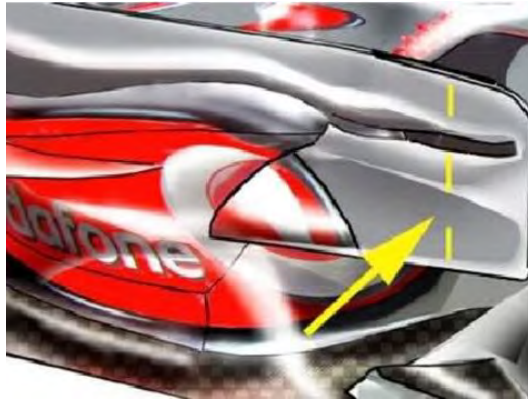


Figura 5.16: Aleta anterior [68].

En la Figura 5.16, podemos observar la presencia de una placa en la parte anterior del pontón. Esta aleta tiene doble función, incrementa la cantidad de aire dirigida a la refrigeración y canaliza el resto de flujo de aire a zonas posteriores.



Figura 5.17: Aletas del pontón del equipo Minardi [69].

Las aletas que podemos observar en la Figura 5.17 se encargan de separar el flujo de aire incidente en las ruedas traseras. Al igual que hacen los perfiles del alerón delantero para las delanteras.

En la Figura 5.18 podemos observar unas aletas situadas cerca de las salidas de escape, éstas se utilizan para dirigir el flujo de aire “limpio y frío” que transportamos desde el frontal del coche, de tal manera que eviten mezclarse con los gases calientes y turbulentos generados por los escapes. Evitando restarle eficacia al alerón trasero.



Figura 5.18: Aletas del pontón en la zona de escape [70].

Otro tipo de aletas que podemos encontrar en los pontones de los monoplazas son los llamados “Turbuladores” (ver Figura 5.19). Como su propio nombre indica, convierten el flujo de aire en un flujo turbulento. El aire a menor velocidad tenderá a pegarse más a la superficie del vehículo, facilitando así su direccionamiento hacia la parte trasera.



Figura 5.19: Turbuladores sobre los pontones en Toro Rosso [71].

Por último mencionaré los “*turning vanes*”, su nombre en inglés indica que es un sistema que hace girar el aire. Consiguiendo un efecto similar a los turbuladores, siendo una parte inicial de la circulación del aire alrededor de los pontones.



Figura 5.20: *Turning Vanes* de Ferrari F138 [71].

5.6. Deflectores Laterales:

A diferencia de el resto de elementos aerodinámicos mencionados la función principal de los deflectores laterales no es la de generación de “*downforce*”, es decir, éstos no se encargan de empujar el coche hacia abajo. Tienen una función distribuidora del flujo de aire.

Tienen dos funciones principalmente; en primer lugar, canalizar el aire hacia los pontones para mejorar así la refrigeración, si nos fijamos los deflectores laterales siguen la forma del chasis y suelen ir sujetos a la esquina inferior exterior del pontón.

La segunda cualidad sería la de orientar los flujos de aire por debajo del coche, en esta ocasión orientar los flujos hacia la parte inferior del pontón. El fondo del coche se encargará como hemos mencionado anteriormente del redireccionamiento del flujo hacia el difusor trasero mejorando así el apoyo aerodinámico.

Dinámica Computacional de Fluidos y Túnel de Viento:

El diseño actual de cualquier monoplaça de competición, viene determinado principalmente por su capacidad para gestionar el flujo aerodinámico que recibe al ponerse en movimiento. Y para optimizar dicha relación existen dos herramientas imprescindibles: el túnel de viento y la Dinámica Computacional de Fluidos.

6.1. Túnel de Viento:

Hoy en día el túnel de viento es la herramienta que toma mayor importancia para definir la filosofía de diseño de un vehículo de F1.

El túnel de viento es un complejo dispositivo diseñado para determinar el efecto que produce un flujo de aire controlado y en movimiento, es decir, con determinadas condiciones de temperatura, presión, etc, alrededor de un objeto. Lo que nos permite calcular coeficientes aerodinámicos, fuerzas aerodinámicas, centros de presiones y momentos aerodinámicos del monoplaça.



Figura 6.1: Maqueta de un monoplaça en el túnel de viento [73].

La infraestructura básica de los túneles de viento de la industria automovilística consisten en un circuito cerrado donde el aire es acelerado por una turbina. Cuentan con una zona en la que se establece el área de pruebas, que es donde se colocarán las maquetas de los vehículos sobre los que se efectuarán los ensayos. En esta zona cabe destacar que lo que se mueve no es la maqueta, sino el tapiz sobre el que se sitúa el monoplaza, y sobre todo, también se encuentra en movimiento el aire que circula alrededor del vehículo, todo lo contrario a lo que sucede en pista. Finalmente en el extremo opuesto a la turbina nos encontramos una estructura de salida al exterior o en el mejor de los casos una estructura de recirculación del aire generado, este caso produce un ahorro de energía considerable. Podemos observar la Figura 6.2, donde encontramos un esquema de un túnel de viento convencional.

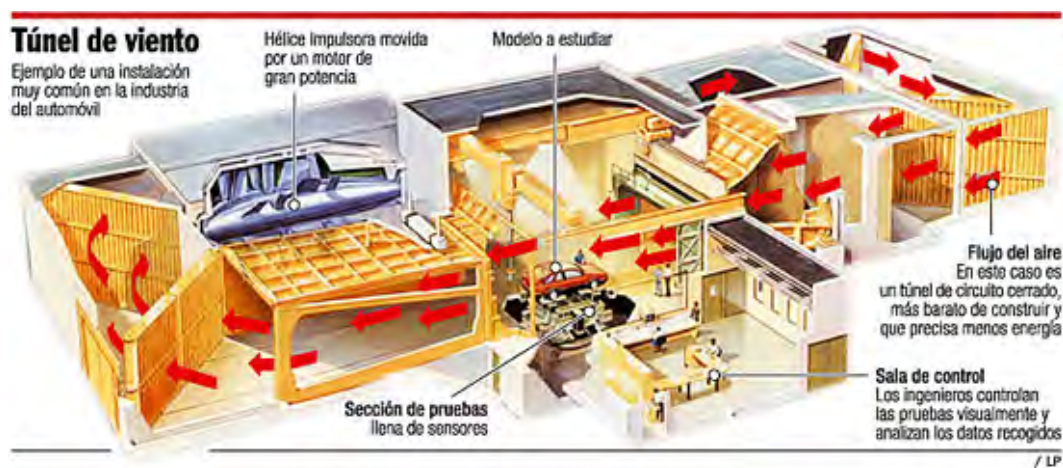


Figura 6.2: Esquema de una instalación de túnel de viento [74].

La maqueta del vehículo debe de ser idéntica al modelo real para que los resultados sean válidos. Eso también incluye todos los elementos realizados por fabricantes externos como son los neumáticos.

Cuanto mayor sea la escala de la maqueta y la separación entre ella y las paredes del túnel, mejores serán las mediciones, aumentando la posibilidad de obtener resultados fiables y precisos. A pesar de ello, uno de los inconvenientes que presenta el estudio con un modelo a escala es que, a pesar de que los resultados obtenidos se puedan extrapolar matemáticamente a la realidad, las turbulencias creadas por el modelo a escala, hacen que aparezcan inevitablemente discrepancias entre los datos del túnel y el circuito.

Este problema hoy en día es inevitable en la F1, ya que el reglamento no permite la utilización de modelos a una escala mayor del 60 % del original. Así como una velocidad de flujo de 50m/s.

A continuación redactaré como calcular algunos factores aerodinámicos y como influyen en la estabilidad y rendimiento del monoplaza.

La maqueta que se utiliza en el túnel de viento está llena de sensores de presión. El objetivo de dichos sensores es el de obtener una distribución de presiones a partir de la cual poder calcular numéricamente las fuerzas. En cada punto de la superficie del vehículo se producen dos fuerzas que tienen que ver con su movimiento en un fluido, en este caso el aire. Una es la fuerza de presión que ejerce el fluido, dicha fuerza se encuentra en la normal de la superficie, mientras que la otra es la de rozamiento con el fluido debido a los efectos viscosos, dicha fuerza se generará tangencial a la superficie.



Figura 6.3: Esquema de fuerzas en un monoplaza [75].

Mediante métodos numéricos, obtenemos distribuciones de fuerzas a partir de las distribuciones de presión obtenidas en los ensayos. Las cuales una vez sumadas te permiten calcular una resultante, que se aplica en el centro de presiones del vehículo. El centro de presiones es el punto donde se aplica la resultante de todas las fuerzas aerodinámicas. Es distinto del centro de gravedad, que es el lugar donde se aplica la resultante de todas las fuerzas de gravedad del monoplaza. Si estos dos centros se encuentran muy distanciados entre sí, el vehículo será inestable. De ahí que en ocasiones sea necesario ajustar el reparto de pesos, de esta manera intentamos modificar la posición del centro de gravedad aproximándolo lo máximo posible al centro de presiones.



Figura 6.4: Esquema de resultante de fuerzas en un monoplaza [75].

En la Figura 6.4 se pueden observar que las fuerzas aerodinámicas tienen una componente en el eje X que se opone al avance del vehículo, llamada Fuerza de arraste o Resistencia aerodinámica (F_x). Y una componente en el eje Y que tiende a elevar el vehículo llamada sustentación.

Influyen otras fuerzas aerodinámicas, pero son menos significativas, siendo de las dos analizadas la más significativa la fuerza de presión, que viene a ser un 70-80 % de las fuerzas aerodinámicas totales que influyen en el vehículo, la de rozamiento influye en torno al 10 %.

6.2. Dinámica Computacional de Fluidos, CFD:

En este apartado hablaremos de la Dinámica Computacional de Fluidos, que supone un complemento perfecto al túnel de viento.

La Dinámica Computacional de Fluidos es un conjunto de técnicas matemáticas y numéricas que nos permite estudiar y analizar el movimiento de un fluido alrededor de un cuerpo sólido, a través de la resolución de unas ecuaciones matemáticas denominadas de Navier-Stokes. En nuestro caso el fluido es el aire que circula alrededor del monoplaza.

Para poder utilizar la CFD necesitamos ordenadores, para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los fluidos con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aún con ecuaciones simplificadas y ordenadores de alto rendimiento, sólo podemos alcanzar resultados aproximados en muchos casos.

La continua investigación nos permite la incorporación de software que reducen el tiempo de cálculo como así también el margen de error, permitiendo analizar situaciones cada vez más complejas, en el siguiente trabajo hemos utilizado el simulador de túnel de viento que nos proporciona la aplicación de Altair®[6], *Virtual Wind Tunnel 13.1*.

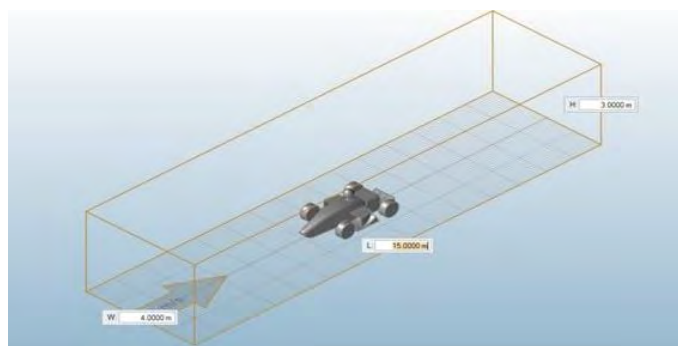


Figura 6.5: Software *Virtual Wind Tunnel 13.1*.

El cálculo mediante ordenador (CFD) nos permite sin necesidad de fabricar una pieza simular su comportamiento, con lo cual se ahorra tiempo y dinero

Para comprobar que las simulaciones realizadas son correctas debemos realizar la correlación entre los datos obtenidos en el túnel real y en el túnel virtual. Para ello debemos realizar la simulación virtual con las mismas condiciones en las que funciona el túnel real, de esta manera se podrán comparar los resultados. Llegados a este punto, podremos realizar ajustes en el modelo virtual para obtener así resultados más fiables. Una vez tengamos el modelo virtual ajustado, podremos realizar las simulaciones teniendo en cuenta todos los parámetros y variaciones que se necesiten.

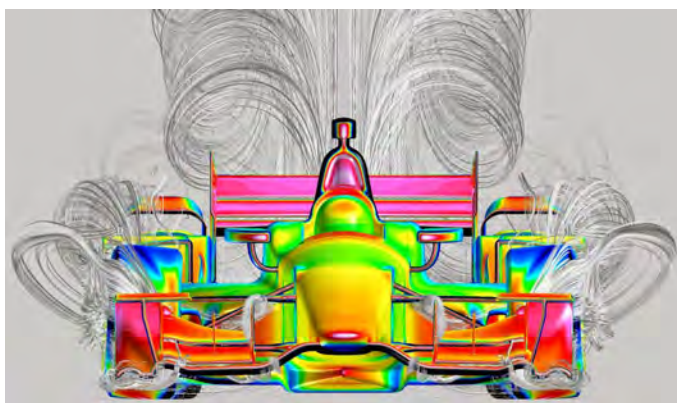


Figura 6.6: Monoplaza simulado en CFD [77].

Uno de los puntos esenciales de la CFD es la elección de la malla (ver Figura 6.7) para resolver las ecuaciones, éstas se resuelven únicamente en ciertos puntos del espacio, ya que es del todo imposible hacerlo en todos ellos. La precisión de los resultados será mayor cuanto mas pequeña sea la malla, pero eso es algo que como hemos mencionado anteriormente en el capítulo, alarga el tiempo de cálculo y, por tanto, la velocidad de desarrollo del monoplaza.

Resumiendo, a partir de la simulacion de CFD podemos extraer gran cantidad de información, tanto cualitativa como cuantitativa. Podemos conocer la distribución de presiones y temperatura, alrededor del monoplaza o en cualquiera de sus partes, las diferentes cargas a las que se ven sometidas las partes del vehículo, incluyendo la carga aerodinámica, la resistencia, fuerzas laterales...

Además, permite disponer de la visualización del flujo de aire alrededor de una parte del monoplaza o sobre todo él de un modo inmediato y directo a partir de los resultados.

A pesar de todos estos valores, debido a la complejidad de dichos cálculos, son múltiples los casos de coches ganadores, a tenor de los datos de simulación, que una vez puestos en pista, resultaron ser un sonoro fracaso.



Figura 6.7: Ejemplo de malla de simulación [78].

Convirtiendo al túnel de viento en la simulación más completa y al estudio CFD en un complemento. Con la CFD obtenemos una aproximación, una especie de filtro a la hora de probar piezas en el túnel de viento, que sí ofrece información real, pero bajo unas condiciones limitadas. Por el contrario, la CFD te proporciona velocidad de desarrollo y un coste muy inferior, ya que para realizar simulaciones en el túnel de viento es necesario construir piezas a escala. Algo que la CFD hace de modo virtual. Un binomio, por tanto, que no merece la pena romper.

6.3. Virtual Wind Tunnel:

A continuación se detallará el software *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®[6], explicando ciertos detalles de su funcionamiento, procesos que utiliza y beneficios que nos proporciona.

Virtual Wind Tunnel 13.1 de *Hyperworks* es una aplicación que nos proporciona una solución vertical, es decir, una solución específica, para un estudio aerodinámico externo. Posee una interfaz gráfica diseñada en función de las necesidades del usuario optimizando el flujo de trabajo. Proporciona un fácil acceso a las herramientas de definición del problema, y a la solución.

La generación automática y personalizable del informe tras cada simulación, nos proporciona un método consistente para la evaluación del diseño, a la par que nos garantiza un tiempo de respuesta rápido que beneficiará nuestro ciclo de desarrollo.

VWT de Hyperworks es impulsado por el solucionador computacional de dinámica de fluidos de Altair®[6], llamado AcuSolve®. Su propósito es el de proporcionar una solución robusta y precisa en un tiempo de respuesta rápido.

Para modelar los flujos turbulentos y predecir el campo de flujo utiliza los modelos de turbulencia de *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) y *Detached-Eddy Simulation* (DES).

6.3.1. Modelos de turbulencia:

Los flujos de aire que rodean al monoplaza durante su desplazamiento son sin duda turbulentos, debido a la reacción del flujo al contacto con los neumáticos en rotación y a los diferentes elementos aerodinámicos que podemos encontrar en el vehículo. En ocasiones el flujo incide directamente de manera turbulenta si éste se encuentra muy cerca de la parte trasera de otro competidor y por eso es tan importante la investigación del tratamiento de la turbulencia en el mundo de la competición automovilística.

Como hemos mencionado anteriormente en este capítulo, el desarrollo de la Fluidodinámica Computacional (CFD) trajo consigo la necesidad de la representación computacional del proceso de la turbulencia, dando lugar a varios modelos computacionales de turbulencia:

- Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS).
- *Detached Eddy Simulation* (DES).
- *Large Eddy Simulations* (LES).
- Modelos de Simulación Numérica Directa (DNS).

La turbulencia se caracteriza por el movimiento caótico y desordenado del fluido. La presencia de remolinos da lugar a movimientos turbulentos del fluido, mientras que si éstos no aparecen, el fluido sería laminar. La aparición de dicho remolino está relacionado con la relación entre las fuerzas viscosas y de inercia en el fluido. De esta manera cuando las fuerzas viscosas son considerablemente grandes respecto a las de inercia, éstas son capaces de amortiguar los pequeños remolinos transformando el fluido en laminar. Sin embargo cuando las fuerzas viscosas son pequeñas respecto a las inerciales, dichos remolinos no son amortiguados y se producirán tanto a pequeña como gran escala, dando lugar a un fluido turbulento.

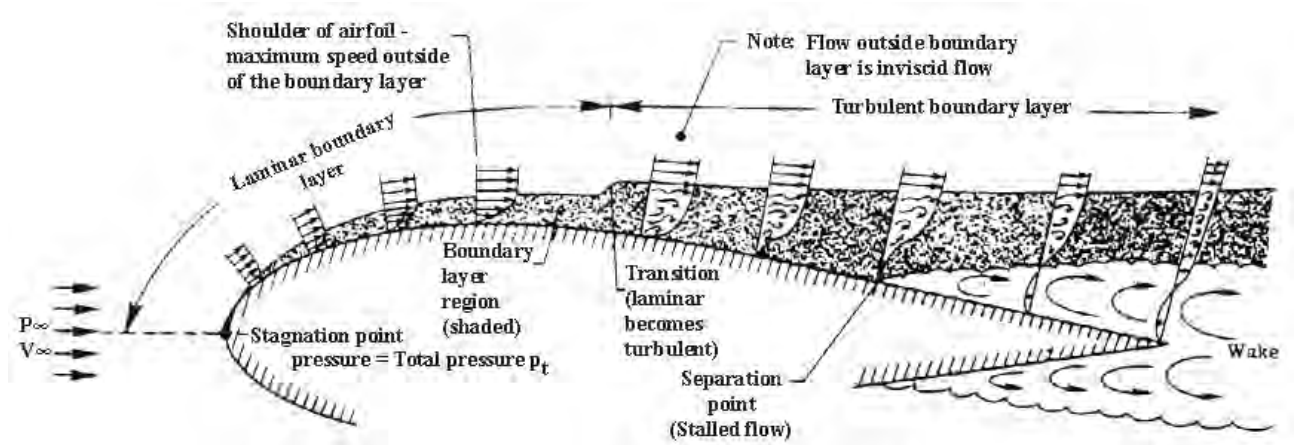


Figura 6.8: Comparación entre flujo laminar y turbulento [83].

Estas características fueron analizadas por Reynolds en su aplicación al movimiento de los fluidos en tuberías. Introduciendo el número que lleva su nombre (Re) que lo definimos como:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (6.1)$$

- **Re:** Número de Reynolds.
- **Densidad:** " ρ " Densidad del fluido.
- **u:** Es la velocidad media del fluido.
- **Viscosidad:** " μ " Viscosidad dinámica del fluido.
- **Viscosidad:** " ν " Viscosidad cinemática del fluido.

El número de Reynolds es un índice de la turbulencia del fluido, también puede interpretarse como la relación entre las escalas longitudinales máximas y mínimas o el tamaño de los remolinos.

Mediante las fluctuaciones de las magnitudes del fluido, especialmente con la velocidad, aunque puede ser cualquier otra magnitud, se puede caracterizar de manera cuantitativa la turbulencia. Sea f una magnitud cualquiera del fluido que se representa como la suma de su valor medio \bar{f} y una componente fluctuacional f' :

$$f = \bar{f} + f' \quad (6.2)$$

Mediante la relación entre la desviación estándar de la magnitud y su valor medio se calcula la intensidad de turbulencia I.

$$I = \frac{\sqrt{\overline{f'^2}}}{\bar{f}} \quad (6.3)$$

6.3.2. Modelos computacionales para el cálculo de la turbulencia:

6.3.2.1. Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)

Los modelos RANS se basan en la promediación de las ecuaciones del fluido, para lo cual todas las magnitudes se sustituyen por la suma de su valor medio y una componente fluctuacional 6.2. Se presentan dos variantes principales de promediación: La de Reynolds y la de Favre. Esta última emplea magnitudes promediadas por unidad de masa, de tal forma que 6.2 se transforma en:

$$f = \tilde{f} + f'' \quad (6.4)$$

donde $\tilde{f} = \frac{\rho \bar{f}}{\bar{\rho}}$ es la magnitud promediada por unidad másica.

La conservación de masa junto con la incompresibilidad del fluido dan lugar a las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (6.5)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (6.6)$$

donde:

- **Presión:** "p"
- **Densidad:** "ρ" Densidad del fluido.
- **Velocidad:** "V"
- **Viscosidad:** "μ" Viscosidad dinámica del fluido. Constante y mayor de 0.
- **Fuerza externa:** "ρg" La gravedad, como fuerza externa.

En todos los casos la dificultad para el cierre del sistema de ecuaciones se deriva de la elección de ecuaciones para representar el tensor de tensiones τ_{ij} que representa las tensiones turbulentas de Reynolds. Para ello se emplea la asunción propuesta por Boussinesq según la cual:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left[2S_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}(\nabla \Delta \tilde{u}) \right] \quad (6.7)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6.8)$$

donde μ_t es el coeficiente de viscosidad dinámica considerando la densidad promediada. Existen en la actualidad diferentes métodos o modelos de solución para el RANS encaminados a calcular este coeficiente de viscosidad.

6.3.2.2. Large Eddy Simulations (LES)

El modelo LES se basa en un filtrado espacial de las ecuaciones de gobierno del fluido, de tal manera que se resuelven computándose las grandes escalas (el movimiento turbulento de grandes remolinos), mientras que para escalas más pequeñas se asume un modelo que permite considerar de forma aproximada su influencia en la variación general de los parámetros del flujo.

6.3.2.3. Detached Eddy Simulation (DES)

Esta nueva técnica trata de aprovechar los puntos fuertes de los modelos RANS y LES, ya que como es conocido los modelos RANS son muy eficientes cerca de la frontera de contorno pero no se comportan tan bien en las regiones alejadas de ella, mientras que los modelos LES se comportan bien en regiones alejadas pero su comportamiento no es tan bueno en las regiones muy próximas a la frontera.

La modificación a los modelos RANS es sencilla, simplemente se sustituye la escala de longitud, d_w , que es la distancia a la pared más cercana, con una nueva escala de longitud de DES, \tilde{l} , que corresponde con el valor mínimo entre la longitud empleada anteriormente, d_w , y el tamaño de rejilla multiplicado por una constante de DES, C_{DES} .

$$\tilde{l} = \min (d_w, C_{DES}\Delta) \quad (6.9)$$

La utilización de dichos modelos nos asegura unos resultados aerodinámicos externos precisos. Para casos de simulaciones en estado estacionario utiliza el enfoque RANS, siempre y cuando la física lo permita, y el enfoque DES para las simulaciones transitorias.

En cuanto a los cálculos asumimos que la deflexión de los materiales es lo suficientemente pequeña como para no realizar un estudio de fluido estructural.

Las ruedas del monoplaza se modelan mediante la prescripción de una velocidad tangencial de la pared, para incluir así los efectos de rotación en la simulación. El material fluido usado durante la simulación se define a partir de parámetros como la densidad y la viscosidad. En este caso utilizaremos el aire.

6.4. Acusolve:

AcuSolve®, de Altair®[6] es un solucionador que proporciona las herramientas necesarias para el procesamiento y posterior exploración de los resultados de la simulación CFD. Los métodos numéricos empleados por AcuSolve® producen simulaciones estables y resultados precisos independientemente de la calidad y la topología de los elementos de malla, facilitando así el trabajo del diseñador. Ésto lo convierte en una potente tecnología que ofrece una de las soluciones más robustas del mercado del CFD.

Los algoritmos utilizados en el programa de cálculo, están diseñados para trabajar con diferentes núcleos en paralelo. Utilizando un modelo (MPI), que se encuentra totalmente automatizado dentro de la escritura de ejecución del programa.

Message Passing Interface (MPI) se utiliza para la comunicación entre máquinas de memoria distribuida y compartida. Nos permite la descomposición del dominio para optimizar la distribución de los elementos y los nodos. Este tipo de paso de mensajes es una técnica empleada en programación para aportar sincronización entre los procesos y permitir la exclusión mutua. También nos otorga una mayor estandarización y portabilidad, permitiéndonos el uso de multiprocesadores, multicomputadores, redes... prestaciones que aminoran de manera significativa el tiempo de simulación y amplían la funcionalidad.

Las principales características de su tecnología solver son:

- Solucionador de presión / velocidad totalmente acoplada para todos los regímenes de flujo compatibles.
- Calculador de la temperatura de flujo para flujos muy boyantes totalmente acoplada.
- Funciones compatibles con el sistema MPI.
- Segundo orden de precisión espacial para todas las tipologías de elementos estructurados: tetraedro de 4 nodos, pirámide de 5 nodos, cuña de 6 nodos y ladrillo de 8 nodos.

- Precisión en integrales de segundo orden para las simulaciones transitorias.

6.4.1. Modelo de turbulencia utilizado por Acusolve:

AcuSolve® también utiliza el siguiente modelo de turbulencia para calcular la viscosidad turbulenta del flujo.

6.4.1.1. Modelo K-Omega:

El modelo de turbulencia k-omega (k- ω) es un modelo de turbulencia común de dos ecuaciones, que se utiliza como un cierre para las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (ecuaciones de RANS). El modelo intenta predecir la turbulencia mediante dos ecuaciones diferenciales parciales para dos variables, k y ω , siendo la primera variable la energía cinética de la turbulencia (k), mientras que la segunda (ω) es la tasa específica de disipación (de la energía cinética de la turbulencia k En energía térmica interna)(Wilcox, 1998):

$$\frac{\partial(\rho \bar{u} k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v} k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G_k - Y_k \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u} \omega)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v} \omega)}{\partial y} = \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (6.11)$$

Donde G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad y G_ω es la generación de ω . Γ_k y Γ_ω representan la difusividad efectiva, es decir, cuantifican la transferencia de materia en las reacciones, de k y ω respectivamente. Las difusiones efectivas para el modelo K y ω son:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (6.12)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (6.13)$$

Donde σ_k y σ_ω son los números de Prandtl turbulentos para k y ω .

Diseño y optimización de una carrocería Formula Student:

En el siguiente capítulo se describen las diferentes etapas en el diseño de una carrocería, los aspectos a tener en cuenta y su posterior optimización.

Partiendo de los “*sketch*” en papel con las ideas originales y formas aproximadas. Posteriormente la realización de su diseño digital, en el que se ha empleado el programa *SolidWorks 2015 (Student Version)*[5], el mallado de los mismos con el programa *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6] y para finalizar con el estudio CFD y la optimización de los resultados el programa de túnel de viento de Altair®[6], *Virtual Wind Tunnel 13.1*.

7.1. Bocetos en papel y conceptos generales:

Para el desarrollo de las líneas básicas de nuestro monoplaça, me he basado en las formas más empleadas en las diferentes competiciones. A continuación se muestran los diferentes bocetos realizados.

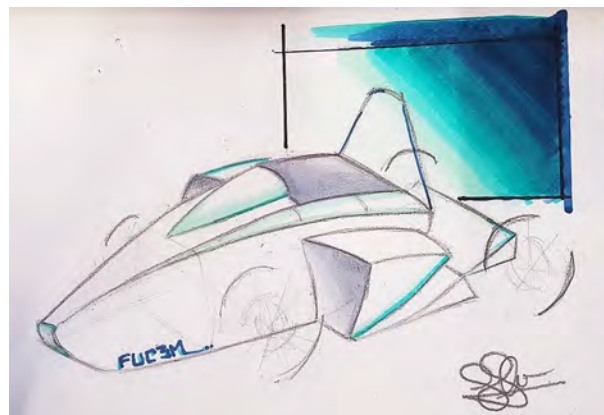


Figura 7.1: Boceto de posible carrocería V1 [Elaboración propia].

Como se puede observar en la Figura 7.1, el diseño del monoplaza es mucho más sencillo que los estudiados anteriormente de F1. En nuestro caso se pueden observar cuatro componentes básicos que son; difusores laterales y trasero, pontones y carrocería. Dichos componentes serán modificados en busca de la optimización de la carrocería.

Fijándonos de nuevo en la Figura 7.1 podemos diferenciar que el método de unión entre el pontón y la carrocería es simple, es decir, no tienen porque pertenecer a la misma pieza, facilitando así su fabricación.

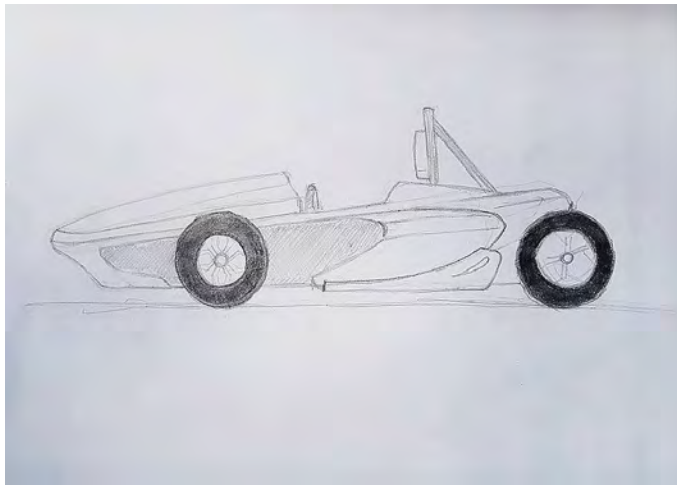


Figura 7.2: Boceto de posible carrocería V2 [Elaboración propia].

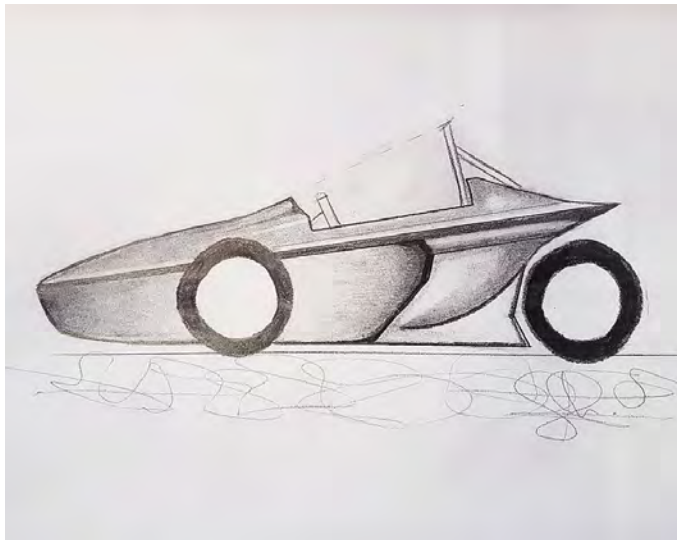


Figura 7.3: Boceto de posible carrocería V3 [Elaboración propia].

En busca de un diseño un poco más vistoso, también realicé bocetos en los que los pontones pertenecieran a la misma pieza de la carrocería. Como se puede observar en las Figuras 7.2 y 7.3. En estos casos, la fabricación se complica, ya que trabajaríamos con piezas mucho más grandes y difíciles de manejar. Otro de los inconvenientes en la fabricación de este tipo de monoplasas, es la complejidad de la realización de los moldes, en los que dependeríamos prácticamente de un patrocinio de máquinas de CNC, ya que su elaboración manual a parte de poco precisa requeriría una gran cantidad de horas de trabajo, considerablemente mayores a las horas empeñadas en la realización de las mismas de manera separada.

Valoradas estas objeciones en cuanto al diseño de la carrocería nos centramos en un monopaza en el que los pontones pudieran ser fabricados de manera independiente a la carrocería, al igual que el año pasado. Obsérvese la Figura 7.4.

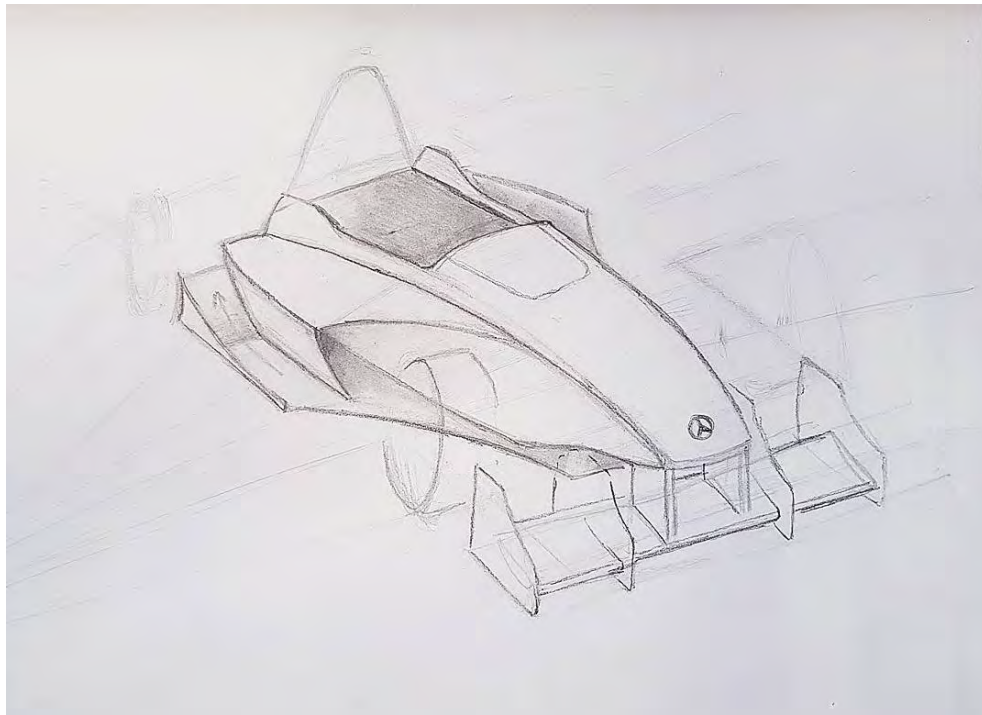


Figura 7.4: Boceto de posible carrocería V4 [Elaboración propia].

Con respecto a los diseños anteriores, se observa como en éste se ha suavizado la parte frontal del monoplaça, realizando un morro más sutil y aerodinámico. El tamaño del morro dependerá del diseño del atenuador de impactos, de modo que las dimensiones se podrán ver modificadas. En cuanto a los pontones, se ha modificado la forma de caja, adquiriendo un aspecto más afilado y agresivo, sin embargo la zona útil sigue siendo la misma. Como se mencionó en capítulos anteriores la función del pontón en este caso es la canalización de aire a la entrada de los radiadores, evitar en la mayor manera posible que dicho aire incida en las ruedas traseras y la generación de empuje vertical.

La idea inicial es que el difusor lateral continúe dentro del pontón, para conseguir una mayor cantidad de “*Downforce*”. Para el máximo aprovechamiento de los difusores laterales, emplearemos la zona inferior del pontón para guiar el aire proveniente del morro a la zona exterior del difusor, como se detallará a lo largo del capítulo.

En la Figura 7.4 se puede observar como se han añadido también deflectores laterales en los extremos del fondo plano, la función de dichos deflectores es la de redirigir el aire. En este caso distribuirá dos flujos de aire diferentes, en primer lugar corregirá la posible desviación del flujo que se desprege de la curva del pontón, orientándolo a la zona externa del difusor. Por otra parte evitará que el flujo que corre por debajo del monoplaza pueda relacionarse con el flujo que circula por la parte superior del fondo plano. Dichos flujos circulan a diferentes velocidades y la interacción entre ellos crearía turbulencias perjudiciales.

En cuanto al diseño del cuerpo de la carrocería, como se puede observar es muy sencillo, carece de curvas pronunciadas que puedan generar turbulencias en el flujo, intentando conducir de la manera más regular posible el aire a la zona trasera del monoplaza.

Por último, aunque en este proyecto no se estudie el diseño de alerones, se ha realizado una forma posible de unión al morro de manera estética y acorde al diseño.

7.2. Diseño en Cad, mallado y simulación:

Como hemos mencionado al cominezo del capítulo, los programas que utilizaremos a continuación son: para el diseño en CAD el programa *SolidWorks 2015 (Student Version)*[5], una vez comprobado que no existan errores en el diseño, mallaremos con el programa *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6] y para finalizar el estudio CFD se realizará con el programa de túnel de viento de Altair®[6], *Virtual Wind Tunnel 13.1*. A lo largo de esta sección detallaremos los pasos realizados con dichos programas, para que sirvan como guía para posibles futuros miembros del equipo Formula Student.

En primer lugar comenzamos realizando el diseño de un monoplaza con el programa *SolidWorks 2015 (Student Version)*[5], en este caso no nos ceñiremos al diseño en papel anteriormente mostrado (Figura 7.4). Realizando un diseño mucho más sencillo y basto, ver Figura 7.5, en cuanto a forma se refiere. De esta manera nos ponemos en contacto con las operaciones de diseño de CAD y tenemos una base sobre la que realizar las mejoras en busca de una evolución del diseño que se aproxime lo máximo posible al boceto inicial y a resultados competentes para un coche de Formula Student.

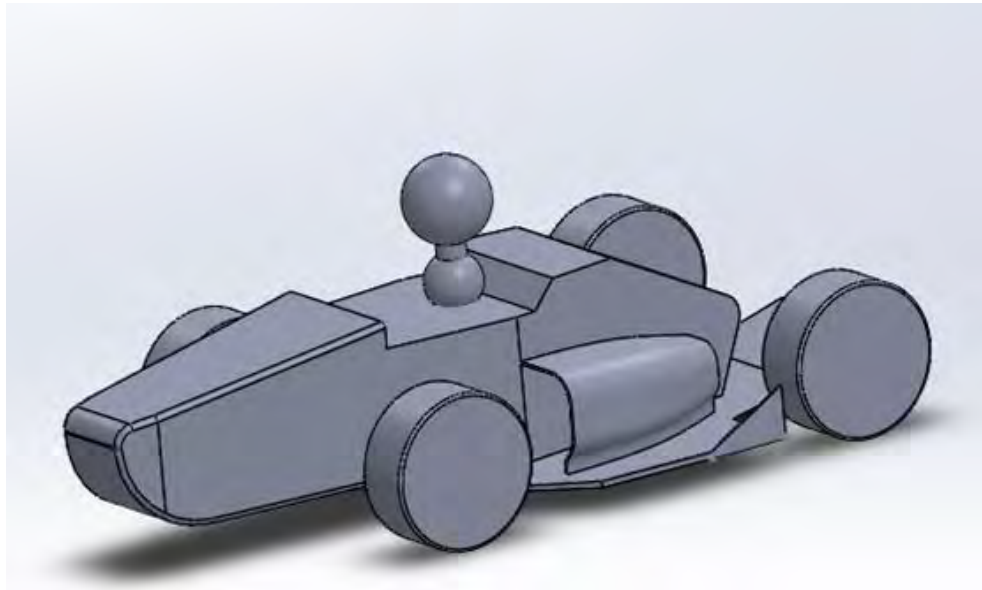


Figura 7.5: Diseño CAD de monoplaça base [Elavoración propia].

Como se puede observar en la Figura 7.5, tenemos un morro con un área frontal más grande, lo que nos supondrá un aumento de “*Drag*” considerable. La forma de ala inversa que posee, en la que la zona inferior es más curva que la superior, provocará que el aire circule a mayor velocidad por dicha zona, de modo que, como explicamos en capítulos anteriores, por acción de Bernoulli la zona superior al tener un flujo de menor velocidad generará una presión mayor que la zona inferior, consiguiendo de esta manera una fuerza de “*Downforce*” que pegará el coche al suelo. En cuanto al fondo plano se refiere, podemos observar que no se le han añadido difusores laterales, dejando un gran margen de mejora. Sí que se diseñó un difusor trasero, con una inclinación de 15° . También le hemos añadido pontones, que dirigirán el aire evitando que éste incida sobre las ruedas traseras.

Las ruedas utilizadas para el estudio CFD tienen unas dimensiones de 216mm de ancho y un diámetro de 513mm (Tipo 10"x7"), una batalla de 1600mm y un ancho de vía de 1300mm.

Para la simulación del piloto hemos utilizado la plantilla masculina de percentil 95, facilitada por el reglamento FSAE 2016 [3], que se puede observar en la Figura 7.6.

Una vez realizado el diseño y comprobado que no tenemos errores ni intersecciones no deseadas entre cuerpos, guardaremos el proyecto en formato .IGES, para poder abrirlo en el programa *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

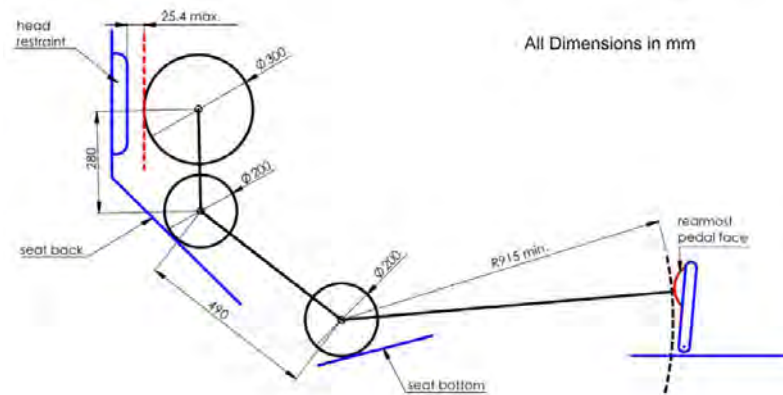


Figura 7.6: Plantilla masculina percentil 95 [3].

7.2.1. Pasos a seguir en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6] :

A continuación realizamos un paréntesis en el capítulo, para enumerar de una manera sencilla los pasos a seguir para el mallado del monoplaza, de tal manera que pueda servir de guía rápida para futuros compañeros.

Al abrir el programa nos aparecerá una ventana emergente, ver Figura 7.7, en la que debemos seleccionar el entorno “Default (hypermesh)”.

7.2.1.1. Importación de la geometría:

En primer lugar debemos de importar la geometría, para ello seleccionaremos el botón que se encuentra dentro del cuadrado verde en la Figura 7.8, una vez seleccionado, pulsamos el botón que aparece en un tono anaranjado, esta opción nos indica que lo que vamos a importar es una geometría. Una vez dentro del entorno de importación de geometría, seleccionamos la carpeta que se encuentra redondeada por el círculo negro, una vez abierta la carpeta, seleccionaremos el documento .IGES que deseamos mallar. Seleccionamos el botón de “Import”. Es muy importante que nos cerciemos de que la ventana de “File Type” se encuentre en IGES.

7.2.1.2. Escalado de la geometría:

Para evitar tiempos de cálculo innecesario en grandes piezas, al igual que en la vida real se escalan los prototipos de los vehículos de F1, en nuestro caso escalamos la figura a una escala de 1:1000. Consiguiendo que el número de elementos totales de la malla sea un número calculable para los ordenadores de sobremesa comunes.



Figura 7.7: Selección de entorno en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

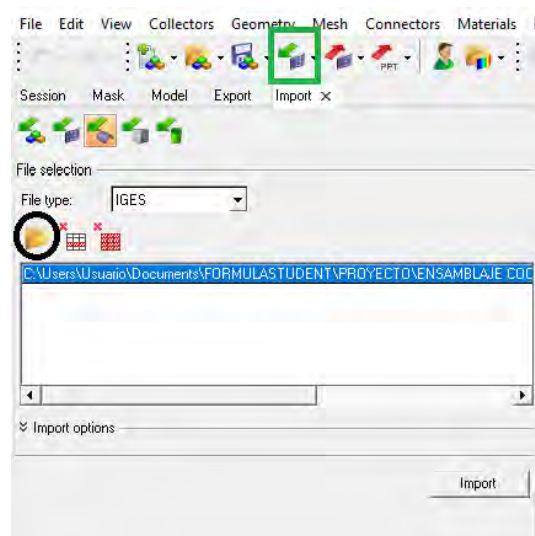


Figura 7.8: Selección Importar geometría en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

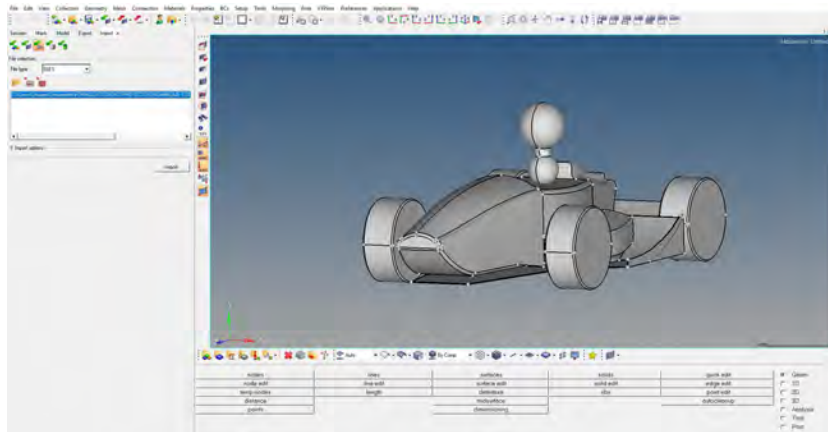


Figura 7.9: Geometría importada en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

Para escalar la geometría en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6], nos guiaremos con la Figura 7.10. Para ello debemos seleccionar en el “*Main Menu*” la opción de “*Tool*”, que se encuentra señalada en la Figura 7.10. Posteriormente seleccionaremos la opción de “*Scale*”, que aparece recuadrada en verde.



Figura 7.10: “*Main Menu*” en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

Una vez dentro del menú de escalar, seleccionamos como se observa en la Figura 7.11, donde los valores de “*xyz scale*” deben de estar en un valor de 1000. Posteriormente pinchamos en el recuadro con la opción de componentes, una vez ahí se nos abrirá la siguiente ventana, (ver Figura 7.12), seleccionamos todos los componentes y aceptamos. De vuelta a la Figura 7.11, pero con todos los componentes seleccionados, pinchamos en el botón de “*scale -*”. Observaremos como el tamaño de nuestra geometría se ha reducido a una escala 1:1000.

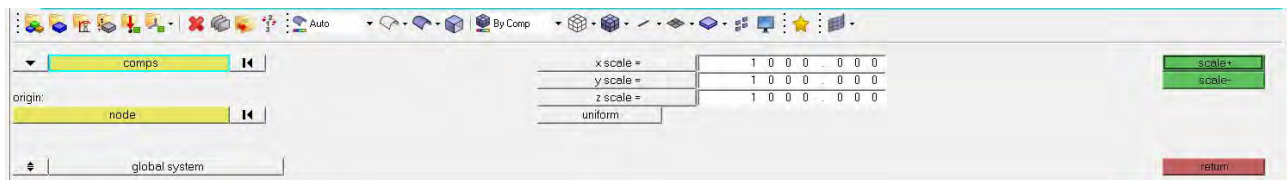


Figura 7.11: “*Menu Scale*” en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

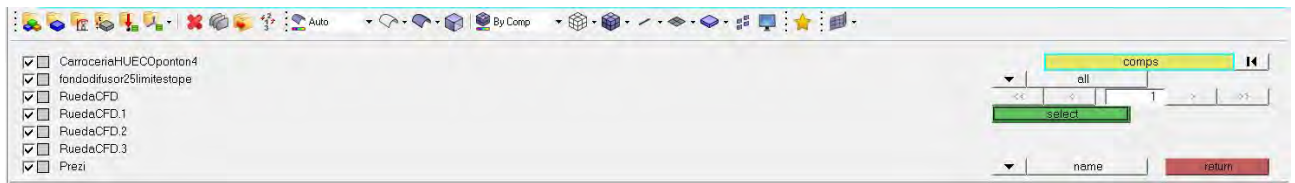


Figura 7.12: “Menu Scale” en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

7.2.1.3. Unión de componentes de la geometría:

Para un correcto mallado, debemos de eliminar todas las superposiciones entre componentes de la geometría, al igual que eliminar posibles caras que se encuentren duplicadas. A continuación detallaremos la solución de estos dos problemas.

Comenzamos solucionando las superposiciones entre componentes, en nuestro caso como se puede observar en la Figura 7.15a, la segunda esfera que simula el cuerpo del piloto, se encuentra introducida en el cuerpo de la carrocería, para solucionarlo debemos de pinchar en la opción de “Geom” del “Main Menu pages”, una vez seleccionado, pinchamos en la opción de “solid edit”, que aparece recuadrada en verde, ver Figura 7.13.

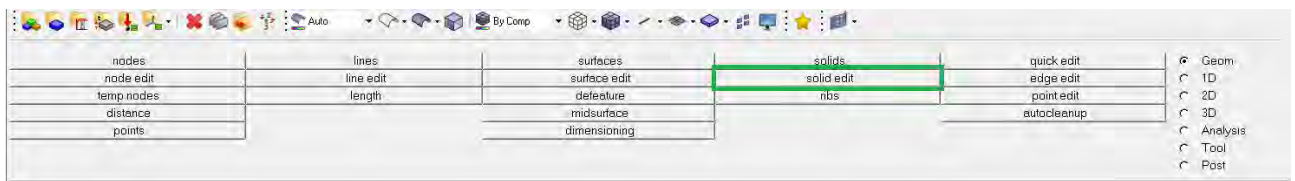


Figura 7.13: “Main Menu” en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

Una vez abierta la ventana de “solid edit”, aparece el siguiente menú, ver Figura 7.14, en la que debemos seleccionar las siguientes opciones, “boolean”, “simple (combine all)” y “ $A + B$ (union)”. De esta manera combinaremos ambos cuerpos, eliminando la parte de la geometría que se encuentra compartida entre ambas piezas.

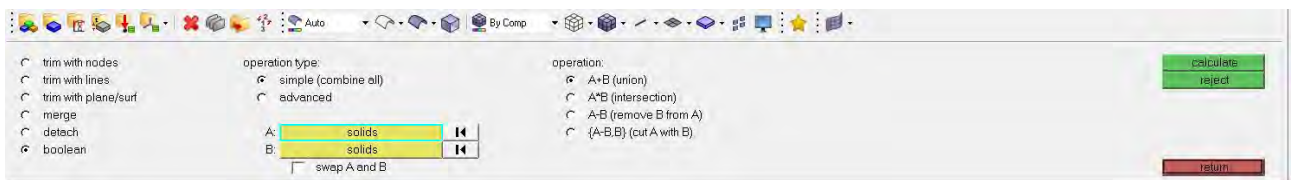


Figura 7.14: “Solid edit menu” en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

Una vez marcadas estas opciones, en nuestro caso, debemos solucionar la superposición entre el piloto y el cuerpo de la carrocería. De modo que, en la ventada de “*Solid A*”, mediante la selección “*by collector*”, seleccionamos el piloto. Una vez seleccionado pasamos a “*Solid B*”, en este caso seleccionaremos el cuerpo de la carrocería. Como se puede observar en la Figura 7.15a ,la segunda esfera que forma el piloto se encuentra completa, introduciéndose a la carrocería, mientras que una vez realizada de unión, observar la Figura 7.15b ,la esfera aparece cortada coincidente con la parte superior del cuerpo de la carrocería.

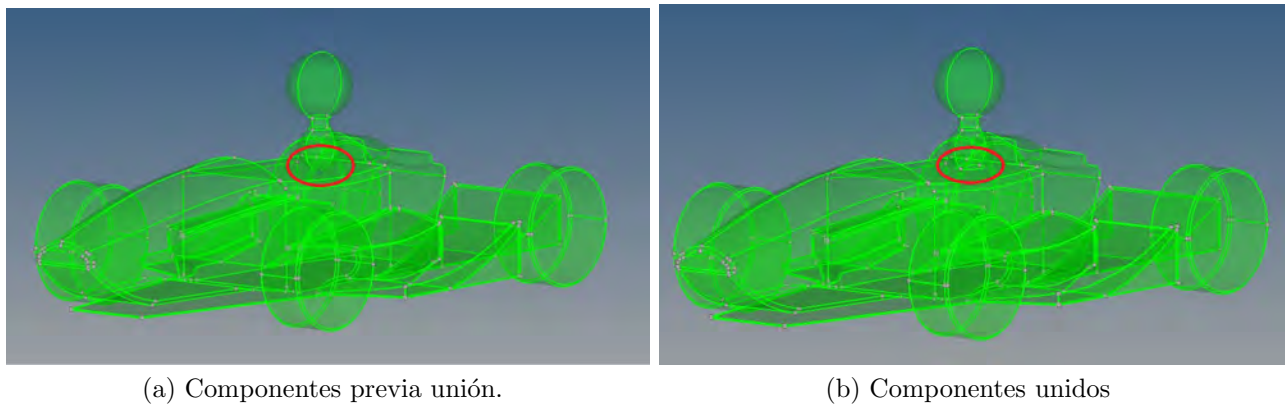


Figura 7.15: Diferencia tras la unión de componentes.

Otro punto que puede dar problemas a la hora de mallar, es el duplicado de elementos. Ésto sucede cuando caras de diferentes componentes se encuentran coincidentes, de este modo al realizar el automallado de cada uno de los componentes (el programa lo realiza por separado), en la cara coincidente se duplican los elementos. En nuestro caso, ésto sucede con la parte inferior del cuerpo de la carrocería y la parte superior del fondo plano. Realizando la unión de dichos cuerpos, tendremos una sola cara perteneciente a ambos cuerpos. El proceso de unión entre cuerpos es el mismo que el empleado anteriormente para la unión del piloto y la carrocería.

7.2.1.4. Comprobar que no existan “*Free edges*” :

El último paso que debemos realizar antes de mallar nuestro monoplaça, es la comprobación de que forme un sólido cerrado. Es decir que no tengamos componentes duplicados, o que se hayan creado “*Free edges*” (aristas vivas que no cierran un sólido), pues ésto puede crear errores en nuestra malla.

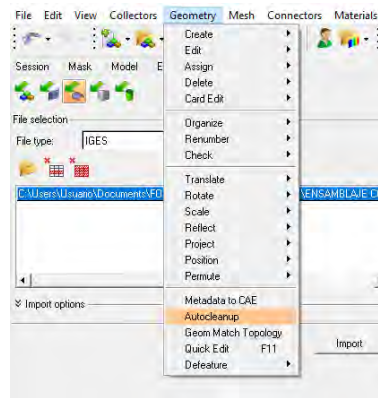


Figura 7.16: “Title Bar” en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

Para ello acudimos a la “Title Bar”, ver Figura 7.16, seleccionamos la opción “Geometry”, una vez abierta la ventana seleccionamos la opción “Autocleanup”, ver Figura 7.16. Una vez seleccionado la opción de *Autocleanup* debería aparecer toda la geometría en verde, tanto aristas como superficies, al igual que aparece en la Figura 7.17, de esta manera podemos comprobar, que no existen “Free edges”, ni superficies problemáticas.

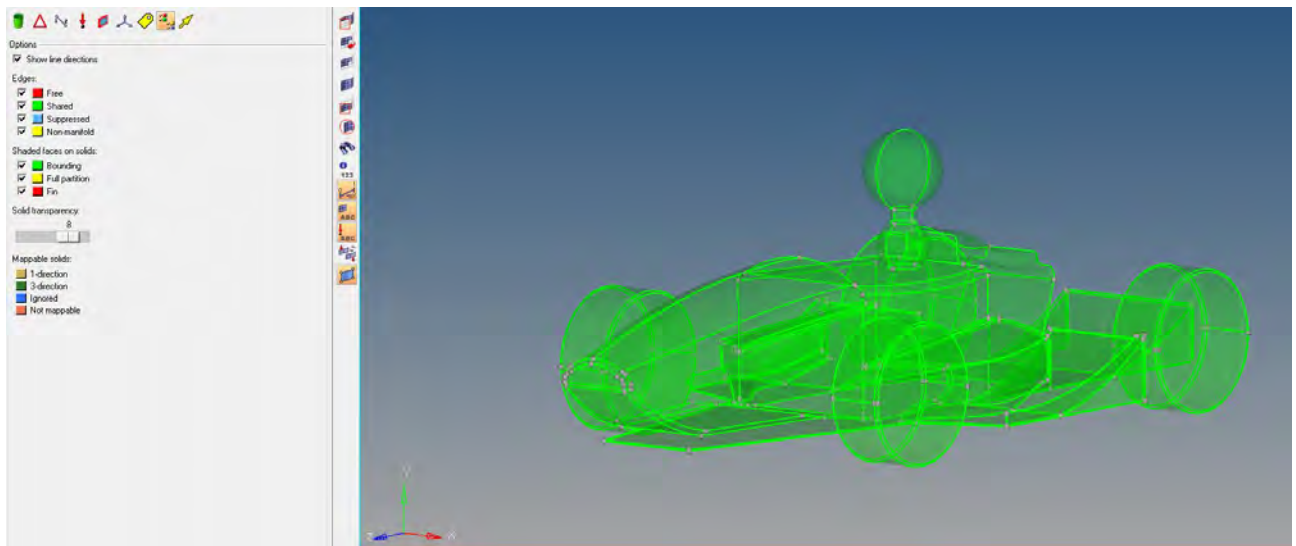


Figura 7.17: Geometría sin errores en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

7.2.1.5. Mallado de la geometría:

Una vez nos hemos cerciorado que no tenemos superficies duplicadas y que nuestra geometría forma un sólido, podremos realizar el mallado.

Debido a las limitaciones de cálculo del ordenador de sobremesa y la calidad de procesado del programa de túnel de viento de Altair®[6], *Virtual Wind Tunnel 13.1*, no es necesario

que la calidad de la malla sea muy alta, de modo que, con la opción del automallado que nos proporciona *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6] será suficiente para realizar nuestros cálculos. Para realizarlo seguiremos los siguientes pasos.

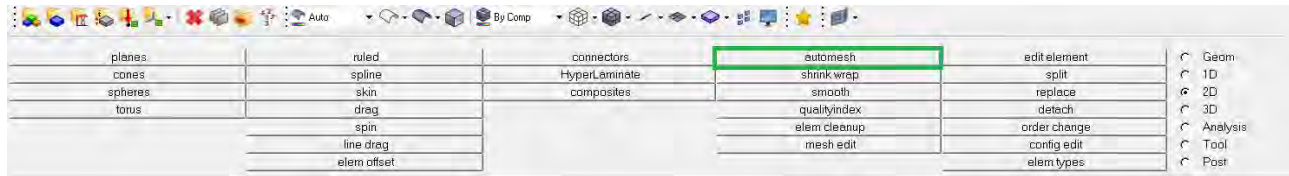


Figura 7.18: “Main Menu” en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

Para la realización del automallado, seleccionamos en primer lugar la opción 2D en la ventana de “Main Menu Pages”, posteriormente pincharemos en “*automesh*”, ver Figura 7.19. Se nos abrirá el siguiente cuadro, ver Figura 7.20.

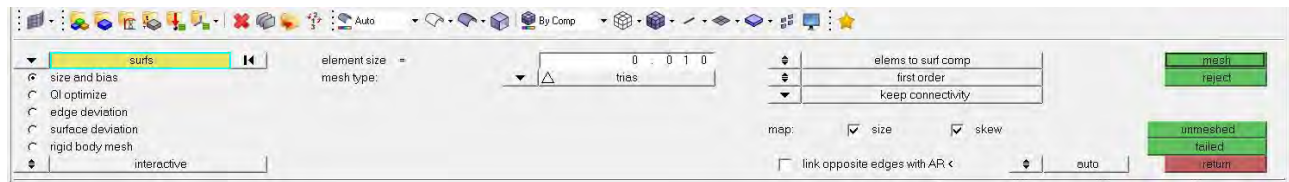


Figura 7.19: “Automesh Menu” en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

Como se observa en la Figura 7.19, tenemos seleccionado la opción “*size and bias*” y trias en el apartado de “*Mesh type*”. En esta ocasión a partir de la selección “*By collector*”, en el apartado de superficies, se han seleccionado las cuatro ruedas. De modo que, el tamaño de elemento que hemos seleccionado ha sido lo suficientemente pequeño como para obtener una mallado de calidad y no perder la forma cilíndrica de la rueda, pero no excesivamente pequeño, pues no queremos sobrecargar de elementos el cálculo y es la carrocería la figura que debe estar más detallada. Tras diferentes pruebas, se comprobó que el tamaño de elemento de 0.01mm era suficiente para obtener un mallado de calidad suficiente para el cálculo. Una vez determinado el tamaño de elemento, pulsamos el botón de “*Mesh*”, obteniendo un total de 87.296 elementos, como se observa en la Figura 7.20.

A la hora de mallar el resto del monoplaza, realizaremos el mismo proceso, pero utilizaremos un tamaño de elemento más pequeños, pues buscamos obtener una malla mucho más depurada y ajustada a la forma del vehículo. En nuestro caso utilizamos un tamaño de elemento de 0.0075mm, dando un total de 465.134 elementos, ver Figura 7.21.

Una vez realizada la malla, comprobaremos que no existan de nuevo “*Free edges*” que eviten que se genere un sólido cerrado. Tampoco pueden existir duplicados. Una vez comprobado que no hay errores, podemos exportar el documento.

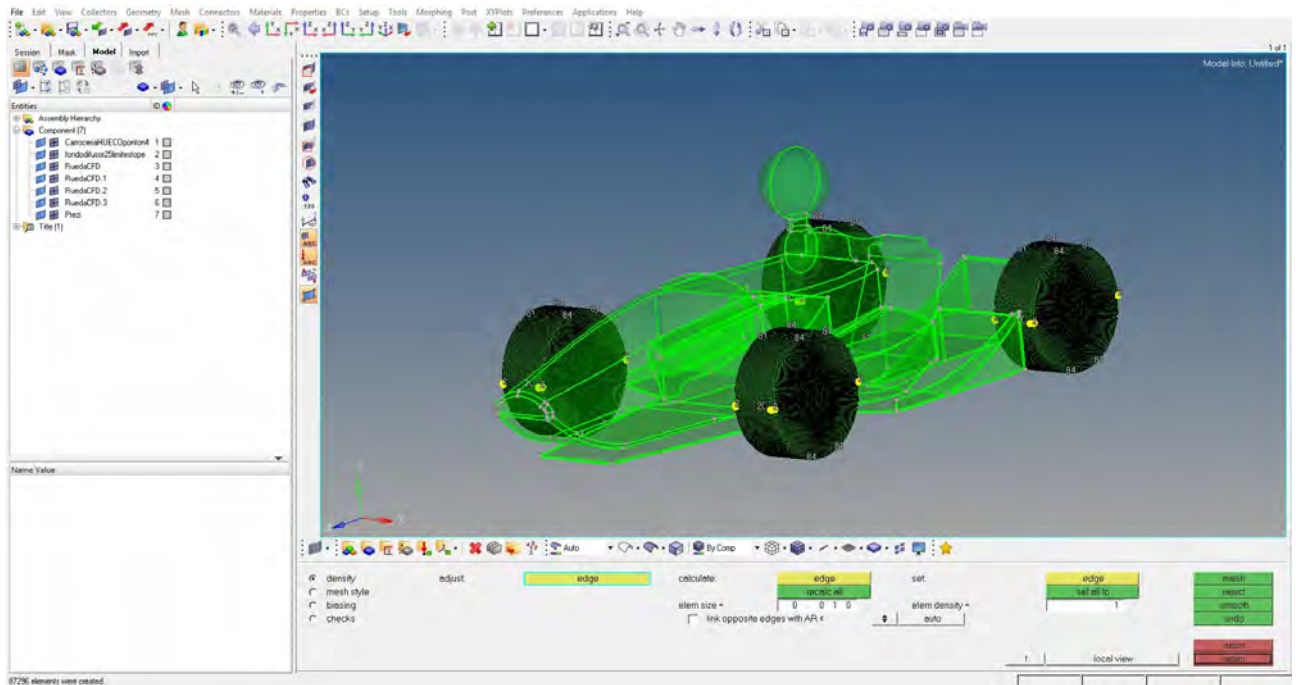


Figura 7.20: Las ruedas malladas en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

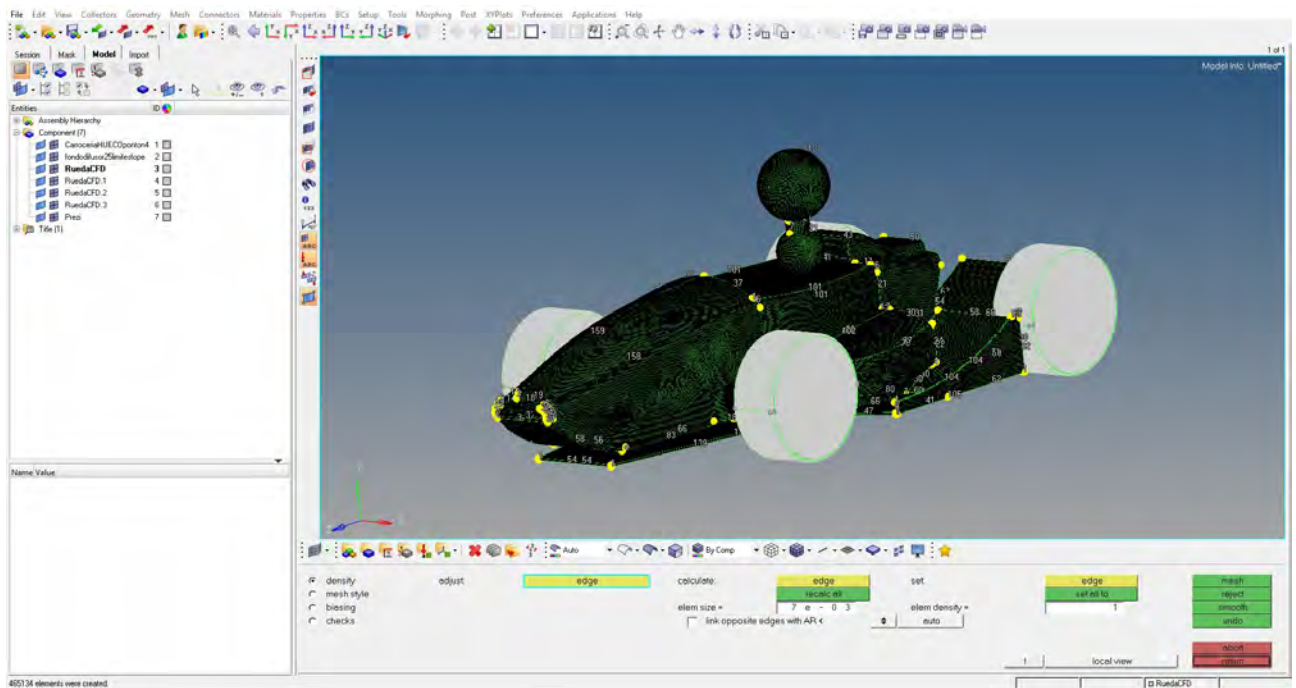


Figura 7.21: Monoplaza mallado en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

7.2.1.6. Exportar geometría:

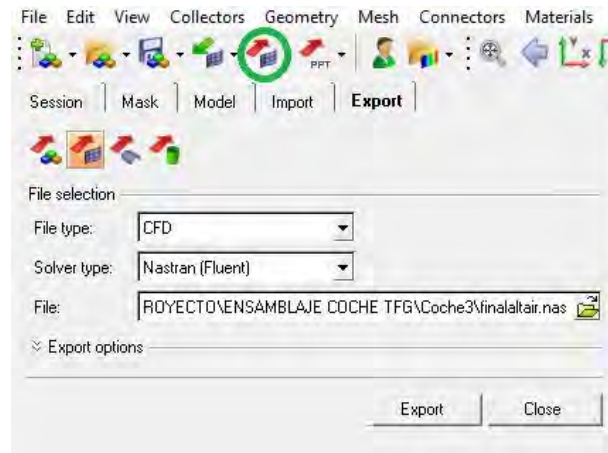


Figura 7.22: Exportar documento en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®[6].

Para exportar la malla de manera que se pueda abrir posteriormente en el programa de túnel de viento de Altair®[6], *Virtual Wind Tunnel 13.1*, debemos exportar el archivo de la siguiente manera, ver Figura 7.22.

Para ello seleccionaremos el botón de exportar (que se encuentra redondeado en verde), posteriormente seleccionaremos el botón de exportar malla (se encuentra destacado en naranja). Para poder abrirlo en *Virtual Wind Tunnel 13.1*, debe estar en CFD, mientras que el tipo de solver debe de ser el de Nastran (fluent). Seleccionamos la carpeta donde deseamos que se guarde y pulsamos “*Export*”.

Al exportar el documento, el programa devuelve a sus dimensiones originales la malla previamente escalada. Para poderlo introducir en *Virtual Wind Tunnel 13.1* en dimensiones reales.

7.2.2. Pasos a seguir en *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®[6] :

El uso de la aplicación del programa de túnel de viento de Altair®[6], *Virtual Wind Tunnel 13.1*, nos permite comprobar si nuestros diseños son competentes aerodinámicamente hablando. Nos permite conocer entre otros valores, los valores de “*Drag*” y “*Lift*”, que son aquellos que tendremos en cuenta a la hora de optimizar nuestro diseño.

Virtual Wind Tunnel 13.1, es un programa que nunca antes habíamos utilizado en el equipo, de modo que esta pequeña guía podrá servir a futuros compañeros para preparar el entorno del monoplaza antes de su simulación.

7.2.2.1. Importar la malla:

En primer lugar debemos de abrir el archivo anteriormente exportado de *Hypermesh Desktop 13.0*. Para ello pinchamos en la carpeta, ver Figura 7.23. Una vez abierta la ventana seleccionamos el documento con terminación “.NAS”.



Figura 7.23: Importar documento en *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®[6].

7.2.2.2. Preparación del entorno:

Una vez importada la malla, debemos cerciorarnos que se encuentra bien situada en el túnel de viento. En ciertas ocasiones puede suceder que los ejes de coordenadas del túnel de viento y de nuestro monoplaza no coincidan, en este caso se aconseja siempre mover el túnel de viento, de tal manera que no variemos las coordenadas de nuestro diseño, evitando posibles fallos de ensamblaje al utilizarlo en otros programas. Variando las coordenadas del túnel, nuestro archivo de malla seguirá intacto. Para ello debemos seleccionarlo y pulsar el botón “Move”, que podemos encontrar en la Figura 7.23.

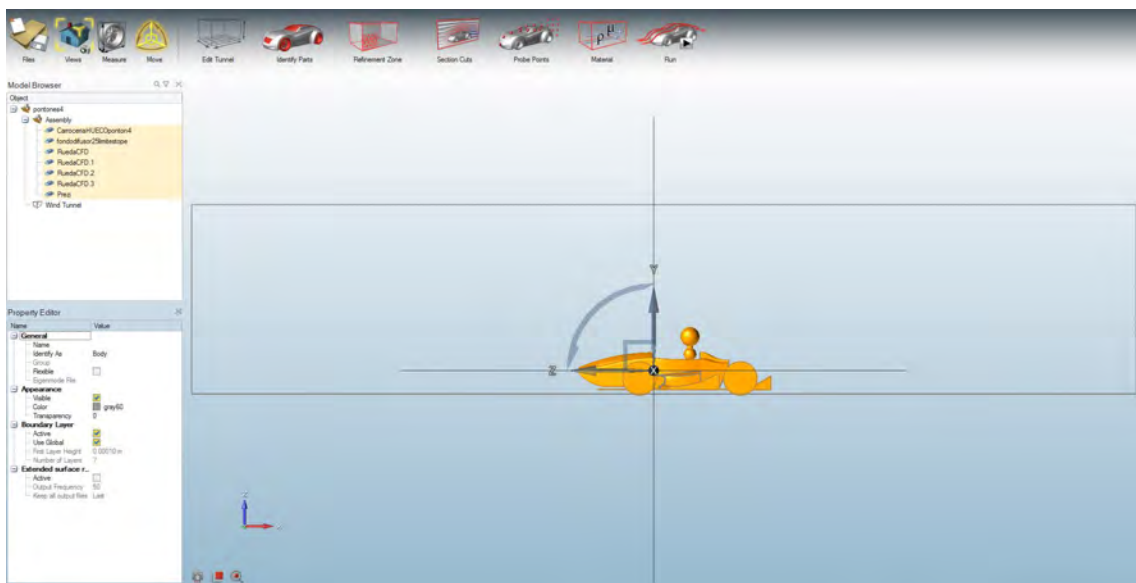


Figura 7.24: Posicionamiento del monoplaza en *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®[6].

Una vez coincidentes los ejes de coordenadas se debe de dimensionar correctamente el túnel de viento. En nuestro caso las dimensiones serán las siguientes; 15m de longitud, 4m de ancho y 3m de alto. Dimensionado el túnel, posicionamos el monoplaa aproximadamente en el centro. Un punto a tener en cuenta, es que las ruedas deben de cortarse con el suelo, de no ser así y encontrarse en monoplaa flotando en el túnel los resultados obtenidos no serían correctos, ver Figura 7.24.

7.2.2.3. Identificación de las partes:

A continuación se debe indicar al programa las diferentes partes del programa. *Virtual Wind Tunnel 13.1* [6] nos da la opción de diferenciar las ruedas del monoplaa, las tomas de aire y la carrocería. En nuestro caso al no tener radiador situado en el pontón, no es necesario que indiquemos ningún “*Heat Exchanger*”, sin embargo, si que debemos de definir las ruedas y a la velocidad que giran las mismas. Para ello señalamos en la opción de “*Identify body*” las ruedas, como se ve en la Figura 7.25. En cuanto a la velocidad, se ha realizado a 50km/h.

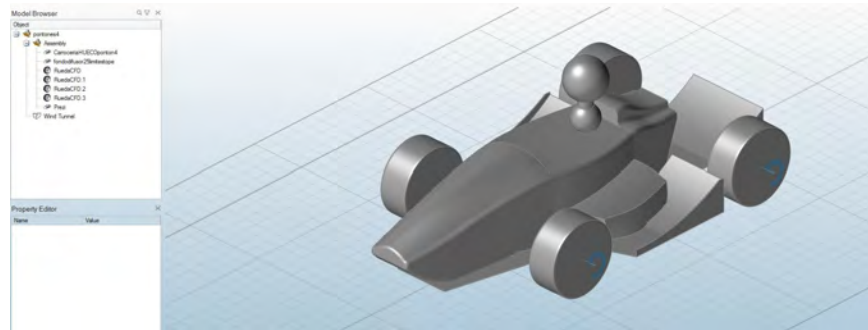


Figura 7.25: Selección de ruedas en *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair® [6].

7.2.2.4. “*Refinement Zone*” y “*Section Cuts*”:

Una vez definidas las ruedas, debemos indicar donde posicionar la “*Refinement Zone*”, en nuestro caso la posicionamos centrada en el monoplaa, ver Figura 7.26a.

La función de la “*Refinement Zone*”, es la de optimizar el tiempo de cálculo a partir de la organización del tamaño de los elementos de malla. Organizando de menor a mayor el tamaño del elemento en función de su importancia, es decir, situando aquellos elementos más proximos al monoplaa, consiguiendo que se ajusten a su forma y aumentándolos de tamaño en función se alejan de él. Los tamaños de los elementos utilizados en los cálculos son los siguientes; en la zona 1, la más próxima al monoplaa el tamaño del elemento es de 0.06099m, la zona 2 poseen un tamaño de 0.12197m mientras que la zona más alejada del monoplaa posee unos elementos de 0.24394m. Como podemos observar el tamaño de los elementos se dobla en función de la zona en la que se encuentre.

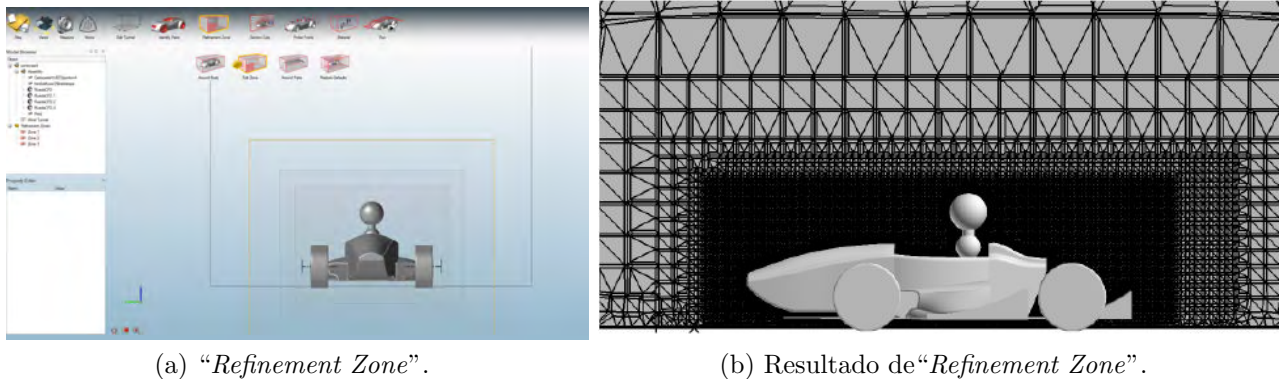


Figura 7.26: "Refinement Zone" en *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®[6].

Los "Section Cuts" nos permiten observar el comportamiento del flujo de aire entorno al monoplaça en la sección deseada. *Virtual Wind Tunnel 13.1*[6] por defecto te realiza una sección en la zona media del monoplaça, para el estudio de nuestro diseño final, como se observará al final de este capítulo, utilizaremos diferentes "Section Cuts" para estudiar diferentes zonas del monoplaça.

7.2.2.5. Detalles de la simulación:

Antes de realizar la simulación de nuestro monoplaça debemos de ajustar los siguientes parámetros. Para ello seleccionaremos el botón "Run" que aparece en la Figura 7.27.

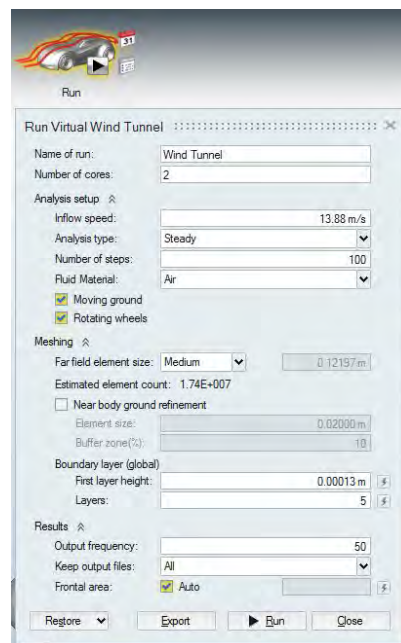


Figura 7.27: "Run" en *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®[6].

A continuación enunciaremos cada una de las opciones del menú con una breve descripción de lo que modifica:

- **Name of run:** Nombre del archivo que vamos a generar.
 - **Number of cores:** Número de núcleos que dispone nuestro ordenador para realizar los cálculos.
 - **Inflow speed:** Velocidad del flujo, en nuestro caso del aire, simulará la velocidad a la que va nuestro vehículo.
 - **Analysis type:** El tipo de análisis, podrá ser transitorio o estacionario, en nuestro caso estacionario. Pues el tiempo de cálculo necesario para un análisis transitorio es considerablemente mayor, se realizó la prueba y el tiempo de cálculo necesario fueron de aproximadamente 4 días. En un flujo estacionario las variables que lo caracterizan son constantes en el tiempo. Debido a que la velocidad en un punto es constante en el tiempo, todas las partículas del fluido que lleguen a un determinado punto seguirán moviéndose a lo largo de la línea de corriente que pasa por ese punto. El patrón de líneas de corriente en un flujo estacionario es constante en el tiempo.
 - **Number of steps:** Número de pasos temporales.
 - **Fluid Material:** En nuestro caso el fluido que envuelve nuestro monoplaza es el aire.
 - **Far Field Element Size:** Podremos modificar el tamaño de los elementos más lejanos. Ésto modificara la precisión de nuestro cálculo, a menor tamaño de elemento, más preciso.
 - **Near body ground refinement:** En nuestro caso no es necesario modificar el tamaño de los elementos del suelo, con el predefinido obtendremos resultados fiables y no aumentaremos el tiempo de cálculo.
 - **Boundary layer:** Nos permite definir el tamaño de la capa límite, y el número de capas. A menor tamaño de la capa límite más se ajustará a la forma del monoplaza y más fiables serán los cálculos.
 - **Output frequency:** Podemos ajustar en que momento y con que frecuencia podremos observar los datos, sin necesidad de que el cálculo haya terminado.
 - **Frontal area:** Al seleccionar “*auto*”, es el programa el que calcula el área frontal del monoplaza, calculando todas las áreas frontales de sus diferentes partes, también existe la opción de introducir nosotros el área frontal del monoplaza calculada anteriormente.
-

Una vez rellenados los campos, podremos pulsar el botón de “*Run*” y esperar a que se realicen los cálculos.

Detallados cada uno de los pasos necesarios para obtener los resultados de una simulación CFD con *Virtual Wind Tunnel 13.1* [6], me dispongo a discutir y comparar cada uno de los resultados obtenidos. Para ello retomamos la Figura 7.5, éstos son los datos obtenidos tras la simulación.

Superficie	Coeficiente de Drag	Coeficiente de Lift	Coeficiente Cruzado
Carrocería 1	0.36850	-0.0974	0.02626
Total	0.78427	-0.09577	0.02142

Tabla 7.1: Estudio carrocería 1 (coarse)

Los resultados de la Tabla 7.1 se han obtenido con un tamaño de elemento “*coarse*”, es decir la precisión más baja que nos permite *Virtual Wind Tunnel 13.1* [6], el tiempo de espera a sido un total de 6.19h. A continuación realizaremos los mismos cálculos, pero con una precisión mayor, comprobaremos si los cambios son considerables y valoraremos el tiempo de espera. Ver tabla 7.2.

Superficie	Coeficiente de Drag	Coeficiente de Lift	Coeficiente Cruzado
Carrocería 1	0.37069	-0.09609	0.02129
Total	0.785196	-0.09601	0.01467

Tabla 7.2: Estudio carrocería 1 (medium)

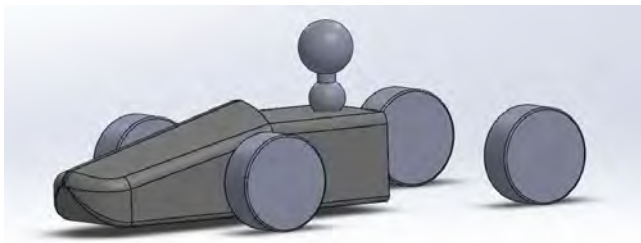
Para la realización de estos cálculos hemos utilizado la precisión “*medium*”, obteniendo unos resultados algo más ajustados y precisos con un tiempo de espera de 7.53h. Un aumento de tiempo permisible. Por último, se realizó la prueba con una precisión “*fine*”, la variación era inferior al 5 %, pero el tiempo de espera en mi ordenador ascendía a más de 3 días, de modo que, se decidió la calidad “*medium*” para la realización de los cálculos.

En cuanto a los resultados obtenidos, se puede observar que los valores del coeficiente de “*Drag*” son bastante elevados, mientras que los de “*Lift*” son muy bajos. Nuestro objetivo en la optimización será la de disminuir los valores de “*Drag*” y conseguir un valor negativo de “*Lift*” mayor. Para ello modificaremos las inclinaciones y longitudes de los difusores, se modificará la forma de la carrocería y se agustará el tamaño y forma de los pontones.

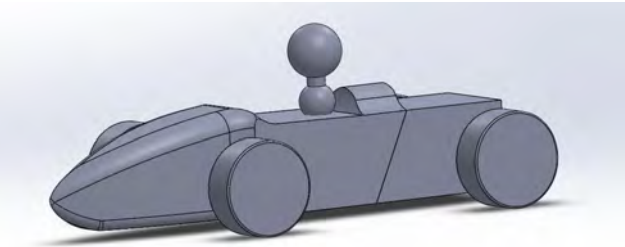
7.2.3. Optimización carrocería:

En primer lugar empezamos modificando el cuerpo de la carrocería. Uno de los objetivos fundamentales para mejorar la carrocería inicial, ver Figura 7.5, es la parte frontal, en la que se observa en la imagen que posee un área frontal demasiado grande y recta.

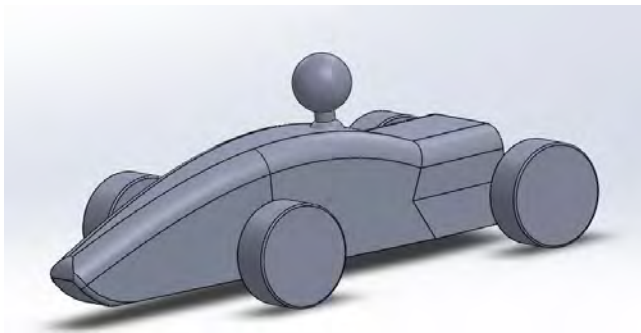
Para facilitar la circulación del flujo de aire, se ha intentado suavizar dicha zona, con una área frontal inferior y aportándole al morro una ligera curva. Como podemos observar diferentes diseños. Se consiguió minimizar el área frontal, pero el espacio disponible para el posicionamiento del atenuador de impactos era demasiado pequeño, de modo que se realizó otra carrocería respetando los mismos objetivos de facilitar el flujo de aire y disminuir el área frontal, pero con un espacio mínimo para posicionar el atenuador de impactos, el resultado fue el siguiente, ver Figura 7.29.



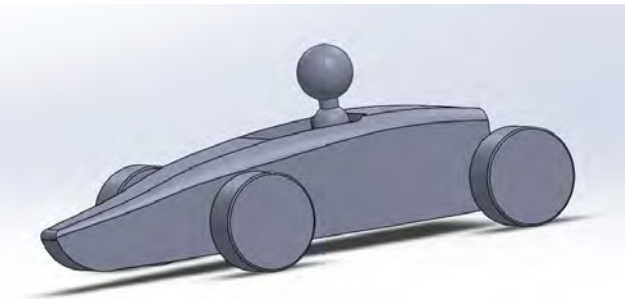
(a) Opción carrocería 1



(b) Opción carrocería 2



(c) Opción carrocería 3



(d) Opción carrocería 4

Figura 7.28: Diferentes propuestas de carrocería.

A continuación, podemos observar el cuerpo de carrocería seleccionado para el monoplaza.

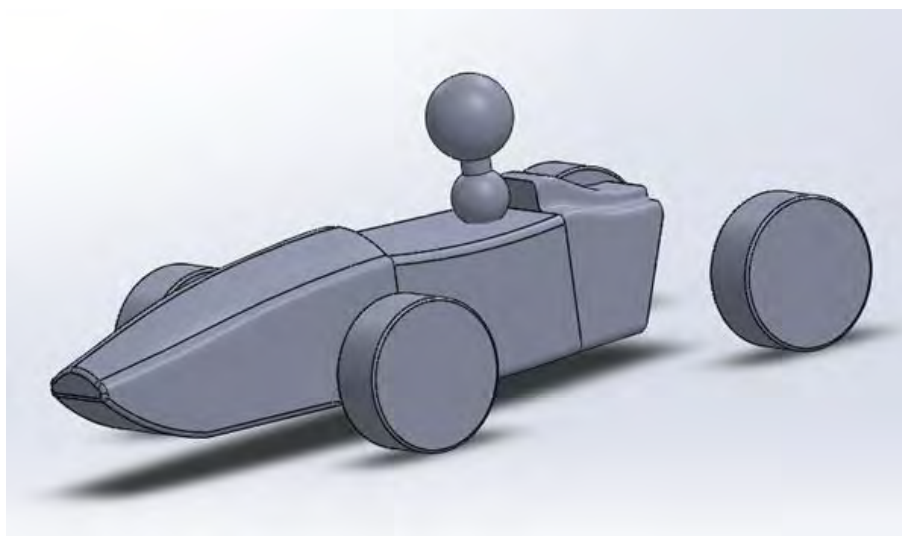


Figura 7.29: Carrocería seleccionada para el monoplaza.

Como se observa en la Figura 7.29, la área frontal del monoplaza se ha visto reducida para disminuir el “*Drag*”, sin embargo el espacio en la punta del morro es lo suficientemente grande como para albergar un atenuador de impactos. También se ha respetado la forma de ala invertida. En la que la parte inferior al tener un recorrido mayor obliga a acelerar el flujo de aire, por consecuencia, como ya hemos demostrado anteriormente, se genera un aumento de presión, lo que hará que aumente el “*Lift*”. A continuación, se pueden observar los resultados recogidos de la simulación de la carrocería en *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®[6], ver Tabla 7.3. En primer lugar se calculó con una precisión “*coarse*”, para comprobar la correcta elaboración de la malla. Una vez comprobado su correcto funcionamiento, se realizaron los cálculos en precisión “*medium*”, calidad mínima con la que se discutirán los resultados en el siguiente proyecto.

En la tabla 7.3, podemos observar la comparativa de la carrocería con la inicial.

Superficie	Coefficiente de Drag	Coefficiente de Lift	Coefficiente Cruzado
Carrocería 1	0.37069	-0.09609	0.02129
Carrocería Def.	0.14877	-0.04127	0.00958

Tabla 7.3: Comparativa entre carrocería inicial y definitiva.

Observamos que los valores de “*Drag*” se han reducido un 60 %. Se debe tener en cuenta que los cálculos de “*Drag*” y “*Lift*” en la carrocería inicial se realizaron teniendo en cuenta también pontones y difusor. De manera que a continuación nos disponemos a introducir los difusores a la carrocería.

Para la selección de los difusores se ha tenido en cuenta su inclinación y longitud. Para ello se han simulado diferentes difusores variando su inclinación en intervalos de 5° y modificando su longitud 50mm. Para disminuir horas de cálculo, en la selección de los difusores, se ha simulado únicamente el fondo plano con los difusores y las cuatro ruedas. Omitiendo el cuerpo de la carrocería y el piloto, de esta manera la cantidad de elementos era considerablemente menor y el tiempo de cálculo de cada una de las pruebas se reducía a 2:30h aproximadamente en calidad “*medium*”. Se debe tener en cuenta que los valores obtenidos de cada uno de los difusores se verán afectados a la hora de introducir el ensamblaje al completo, pues el cuerpo de la carrocería obstruirá el flujo de aire del difusor trasero, disminuyendo el “*Drag*” que éste crea, al igual que la cantidad de “*Lift*”.

Para el cálculo de los difusores partiremos de una longitud mínima inicial de 200mm para los laterales y 250mm para el trasero. En cuanto a la inclinación partiremos de 5° e iremos aumentando progresivamente en periodos de 5° . Para comprobar las consecuencias del aumento de longitud e inclinación hemos realizado los cálculos hasta una inclinación de 15° , una longitud lateral de 300mm y una longitud del difusor trasero de 350mm. A continuación podemos observar la tabla 7.4 con los resultados obtenidos.

GRADOS	LONGITUD LAT. (mm)	LONGITUD TRA. (mm)	DRAW	LIFT	DRAW TOTAL	LIFT TOTAL
5	200	250	0.10811	-0.0618	1.24525	-0.04142
5	250	300	0.11021	-0.04525	1.23619	-0.04525
5	300	350	0.11215	-0.17385	1.24005	-0.21366
10	200	250	0.1384	-0.38385	1.14006	-0.70027
10	250	300	0,15029	-0,43703	1,11623	-0,78204
10	300	350	0,16016	-0,455	1,11698	-0,55855
15	200	250	0,18035	-0,49261	1,1223	-0,47918
15	250	300	0,19834	-0,55999	1,11259	-0,6399
15	300	350	0,230533	-0,72832	1,1325	-0,73059

Tabla 7.4: Tabla de valores en función de inclinación y longitud

- “*Drag*”: Coeficiente de “*Drag*” generado por el fondo plano y difusores.
- “*Lift*”: Coeficiente de “*Lift*” generado por el fondo plano y difusores.
- “*Drag*” Total: Coeficiente de “*Drag*” generado por el fondo plano, difusores y las ruedas.
- “*Lift*” Total: Coeficiente de “*Lift*” generado por el fondo plano, difusores y las ruedas.

Para observar la evolución de los resultados de una manera más visual, hemos realizado una gráfica, ver Figura 7.30.

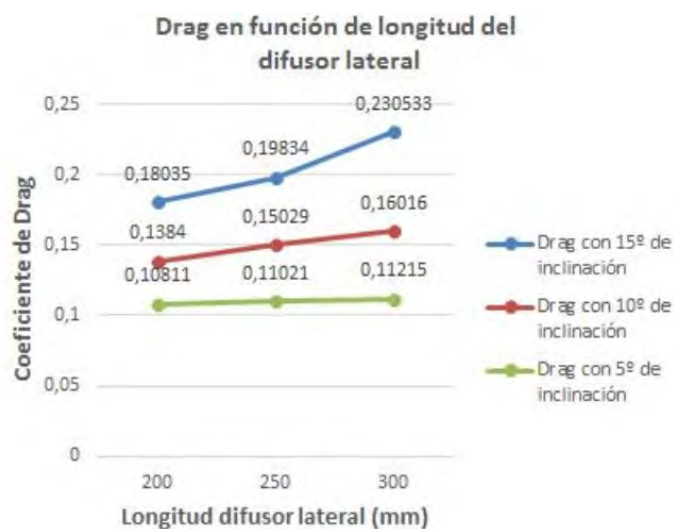


Figura 7.30: Evolución del coeficiente de “Drag” en función de inclinación y longitud.

Para valorar la evolución del coeficiente de sustentación se ha realizado otra gráfica, observar Figura 7.31.

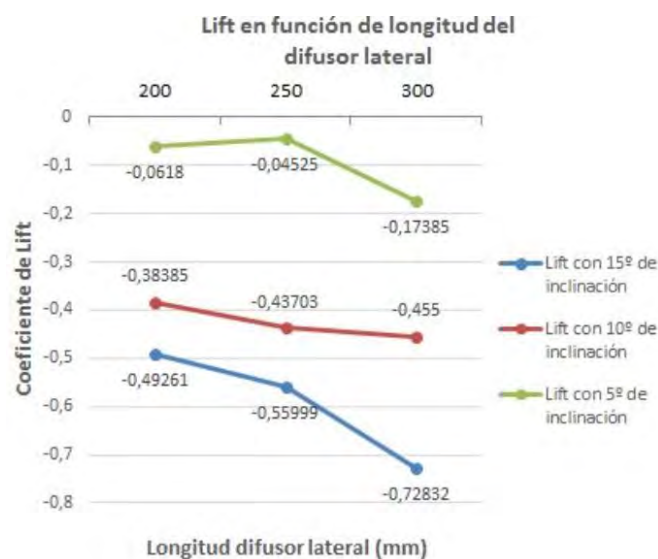


Figura 7.31: Evolución del coeficiente de “Lift” en función de inclinación y longitud.

Como se puede observar en las gráficas el valor de los coeficientes de “*Drag*” y “*Lift*” aumentan en función del aumento de la longitud de los difusores. El fondo con los difusores más largos (300mm los laterales y 350mm el trasero) es el fondo que más “*Lift*” genera, también posee el mayor “*Drag*”, pero cuando añadamos el cuerpo de la carrocería dicho valor disminuirá, pues la cara frontal del difusor trasero permanecerá detrás de la carrocería.

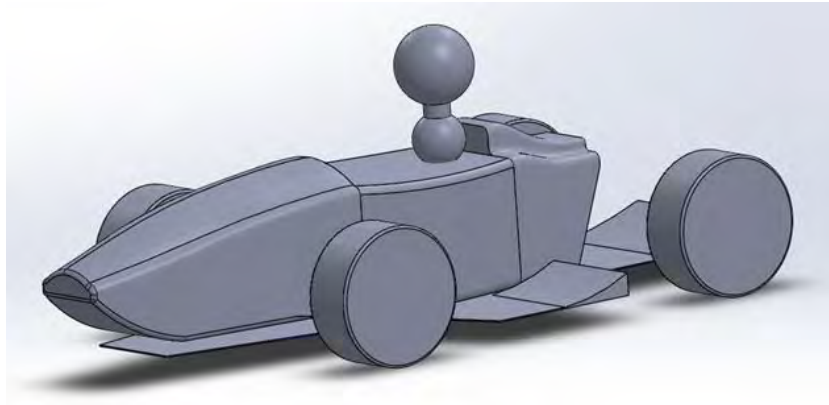


Figura 7.32: Ensamblaje con fondo plano y difusores con inclinación 15° y longitudes 300mm y 350mm

Para analizar como afecta a los valores la introducción del cuerpo de la carrocería, se ha simulado el ensamblaje completo con dicho fondo plano, ver Figura 7.32. La simulación en calidad “*medium*” ha tardado 8.10h, el doble que en calidad “*coarse*”.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Fondo y difusores	0.06370	-0.00305	-0.00069
Carrocería Def.	0.15539	-0.27899	0.00159
Total	0.632121	-0.287178	0.011311

Tabla 7.5: Valores de ensamblaje definitivo con difusores de 15° y longitudes 300mm y 350mm

Tras los resultados obtenidos podemos deducir dos conclusiones claras, en primer lugar se puede comprobar la mejora resultante en cuanto al ensamblaje total de la carrocería, observamos la comparativa en la tabla 7.6. En la que los valores de coeficiente de “*Drag*” se han visto disminuidos, a la par que el coeficiente de “*Lift*” aumenta.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Total Carrocería 1	0.785196	-0.09601	0.01467
Total Carrocería Def.	0.632121	-0.287178	0.011311

Tabla 7.6: Comparativa entre ensamblaje carrocería inicial y definitiva (medium)

Un segundo punto a tener en cuenta es la disminución de efectividad de los difusores, en los que comparando los valores con y sin carrocería observamos como bajan drásticamente, ver tabla 7.7. Aumentando la efectividad de los difusores, conseguiremos optimizar la carrocería, mejorando aún más los valores con respecto al ensamblaje inicial.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Fondo y Difusores sin carr.	0.23053	-0.72832	0.00071
Fondo y Difusores con carr.	0.06370	-0.00305	-0.00069

Tabla 7.7: Comparativa entre fondo plano y difusores con y sin carrocería

Para aumentar la eficiencia de los difusores ya hemos comprobado que se debe aumentar tanto su inclinación como su longitud. Una vez conocida tal tendencia, se han realizado los difusores con la longitud máxima permitida por la normativa, es decir, con una distancia entre el final del difusor y el principio del neumático de 75mm, ver Figura 1.6, mientras que el difusor trasero no se puede alejar más de 250mm de la parte más retrasada del neumático trasero.

A la hora de simular el nuevo ensamblaje se ha mantenido el grado de inclinación de 15° de los difusores, sin embargo, los hemos alargado hasta el límite de la normativa, quedando una longitud lateral de 475mm y una longitud del difusor trasero de 450mm.

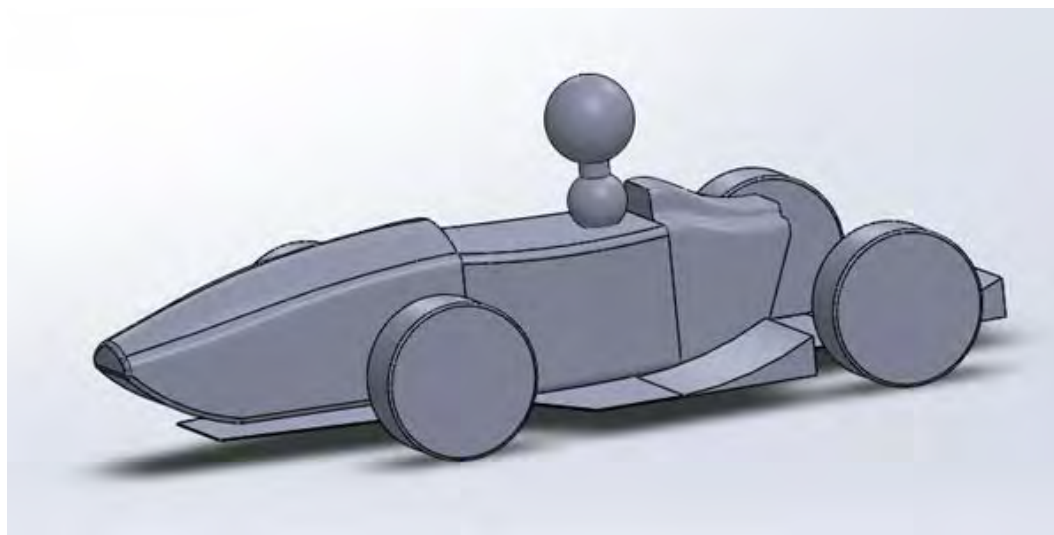


Figura 7.33: Ensamblaje con fondo plano y difusores con inclinación 15° y longitudes 475mm y 450mm

Como se puede observar en la Figura 7.33 los difusores laterales quedan mucho más pegados a los neumáticos traseros, esto generará una disminución en el coeficiente de “*Drag*” provocado por dichos neumáticos, pues su área frontal expuesta es menor. Al aumentar la longitud del difusor también se deberá observar un aumento en la generación de “*Lift*”. A continuación se muestra en la tabla 7.8, los resultados obtenidos tras la simulación del ensamblaje a una calidad “*medium*”. También se puede ver en la tabla 7.9 la comparativa entre ambos fondos planos.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Difusores a 15° y lim.	0.09676	-0.21867	-0.00140
Carrocería Def.	0.16076	-0.25939	0.01632
Total	0.68058	-0.53315	0.007069

Tabla 7.8: Valores de ensamblaje definitivo con difusores de 15° y longitudes 475mm y 450mm

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Fondo y Difusores 15°.	0.06370	-0.00305	-0.00069
Fondo y Difusores 15° y long. lim.	0.10418	-0.21787	0.00092

Tabla 7.9: Comparativa entre fondo plano y difusores con 15° de inclinación y longitudes en primer lugar 300mm y 350mm y longitudes límite.

Como se apunta en la tabla 7.9 el aumento del coeficiente de “*Drag*” es mínimo, si comparamos con la mejora de un 98 % en el coeficiente de “*Lift*”. Encontrada la mejora considerable al utilizar las longitudes máximas en los difusores, probaremos con diferentes inclinaciones aumentando en 5°, hasta encontrar el ángulo en el que el nivel de “*Drag*” sea inadmisibles o el coeficiente de “*Lift*” descienda.

Para ello hemos vuelto a simular los fondos planos con sus difusores, sin tener en cuenta la carrocería, ahorrando así tiempo de cálculo. En todas las simulaciones se han mantenido las longitudes límite de 475mm en los difusores laterales y 450mm en el difusor trasero. De modo que sólo existía una variable, la inclinación.

GRADOS	LONGITUD LAT. (mm)	LONGITUD TRA. (mm)	DRAG	LIFT	DRAG TOTAL	LIFT TOTAL
15	475	450	0,33296	-1,32128	0,9846	-1,4205
20	475	450	0,39592	-1,50299	0,91946	-1,49597
25	475	450	0,50919	-1,66722	0,94281	-1,66722
30	475	450	0,55845	-1,42686	0,95406	-1,39128
35	475	450	0,71462	-1,55082	1,00211	-1,52594

Tabla 7.10: Diferentes inclinaciones para difusores con longitud límite.

Para una comprensión más visual de los datos, reflejamos los resultados en dos gráficas, la primera, ver Figura 7.34, en la que podemos observar la evolución del coeficiente del “*Drag*” en función del aumento de la inclinación. Mientras que en la siguiente Figura 7.35 vemos el aumento del coeficiente de “*Lift*”.

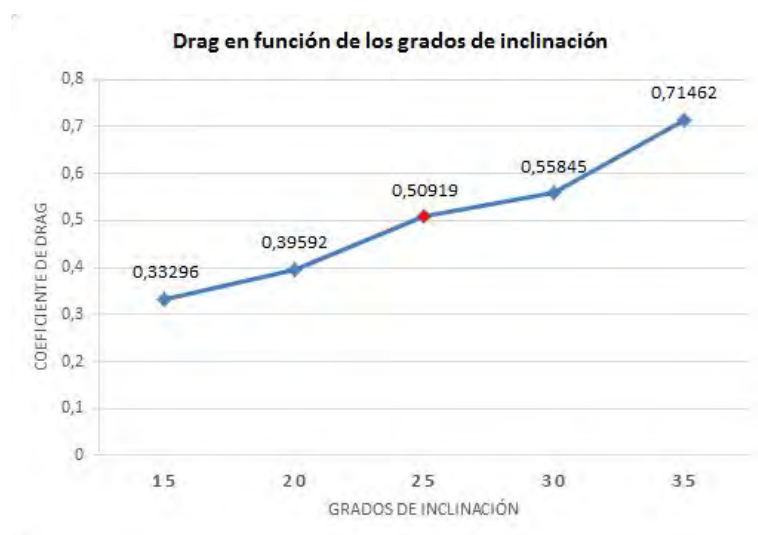


Figura 7.34: Evolución del Coeficiente de “*Drag*” en función de la inclinación.

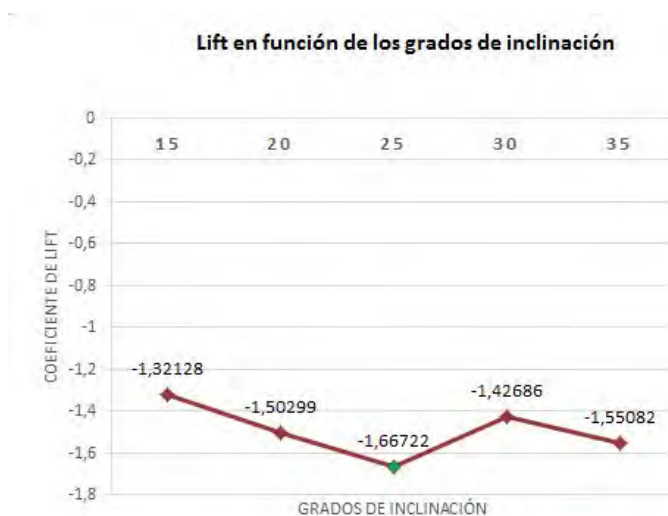


Figura 7.35: Evolución del Coeficiente de “*Lift*” en función de la inclinación.

Como se puede observar en la Figura 7.34 la evolución del coeficiente del “*Drag*” es bastante uniforme en función del aumento de la inclinación, sin embargo las inclinaciones de 30° y 35° ya nos aportan unos coeficientes demasiado elevados para nuestro monoplaza. Antes de elegir una inclinación óptima pasemos al estudio de la Figura 7.35 en la que como se puede ver a partir de los 25° el coeficiente de “*Lift*” disminuye. De este modo la inclinación de 25° es aquella que nos aporta una mayor carga de “*Lift*” al monoplaza.

Una vez seleccionada la nueva inclinación de los difusores, realizamos la simulación con el ensamblaje de la carrocería y comparamos resultados. El cálculo se ha realizado en calidad “*medium*” y se ha tardado 8.11h.

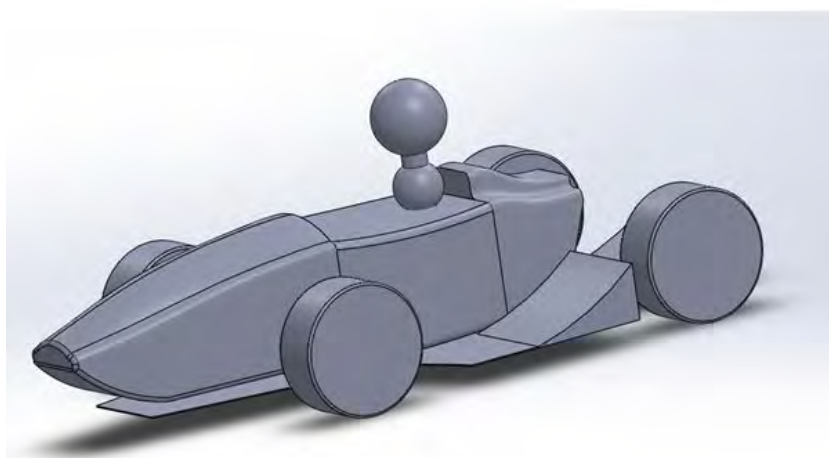


Figura 7.36: Ensamblaje con difusores a 25° y longitudes límite.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Difusores a 25° y lim.	0.210176	-0.47162	-0.00201
Carrocería Def.	0.14003	-0.30160	0.00345
Total	0.674545	-0.71761	0.01245

Tabla 7.11: Valores de ensamblaje definitivo con difusores de 15° y longitudes 475mm y 450mm

En la Tabla 7.11, podemos observar los resultados obtenidos en la simulación del ensamblaje completo. Para analizar las mejoras obtenidas se han desglosado los resultados realizando una comparativa con el modelo anterior de fondo plano con difusores a 15° y longitudes límite.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Fondo y Difusores 15° y long. lim.	0.10418	-0.21787	0.00092
Fondo y Difusores 25° y long. lim.	0.210176	-0.47162	-0.00201

Tabla 7.12: Comparativa entre fondo plano y difusores con 15° y 25° de inclinación y longitudes límite.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Total Carrocería 15° lim.	0.68058	-0.53315	0.007069
Total Carrocería 25° lim.	0.674545	-0.71761	0.01245

Tabla 7.13: Comparativa entre ensamblaje carrocería con difusores a 15° y carrocería con difusores a 25°

En un primer momento comparando la efectividad de cada uno de los fondos planos, observamos en la Tabla 7.12, cómo el difusor con mayor inclinación nos aumenta más del doble el “*Lift*” que genera el monoplaza. También los valores de “*Drag*” se ven aumentados al doble, pero como se puede observar en la siguiente Tabla 7.13, los valores totales del “*Drag*” disminuyen. Esto es posible, ya que el “*Drag*” generado por las ruedas traseras, al encontrarse éstas ligeramente más tapadas por el difusor es considerablemente menor. Concretamente el coeficiente de “*Drag*” con el difusor de 15° es de 0.04 aproximadamente y en el caso del difusor a 25°, dicho valor disminuye a la mitad, quedando en 0.02.

En cuanto a los resultados generales de la carrocería, nos encontramos con unos valores de coeficiente de “*Lift*”, de -0.71761, que son elevados si pensamos que se refiere solo al ensamblaje de la carrocería. En el momento que se añadan los alerones, obtendremos un monoplaza con un “*Downforce*” muy competitivo.

Para finalizar la realización del ensamblaje de la carrocería introduciremos los pontones. Como hemos mencionado anteriormente en el trabajo, su objetivo principal en un “*formula student*” es el de proteger el escape y cubrir el radiador. El año pasado, los pontones eran dos láminas perforadas a las que se les realizó un pliegue a 90° y se situaron fijadas al cuerpo de la carrocería y al fondo plano. Mi objetivo es el de realizar unos pontones que a parte de proteger dichos dispositivos, nos aporten una mejora aerodinámica al monoplaza. Para que esto sea posible, se ha simulado en *Fluent 17.2* de ANSYS®[84], un perfil de pontón variando las posibles alturas de entrada y salida del aire, este trabajo lo hicimos los miembros de aerodinámica para el monoplaza de este año. Se obtuvieron los siguientes resultados, ver Figura 7.37.

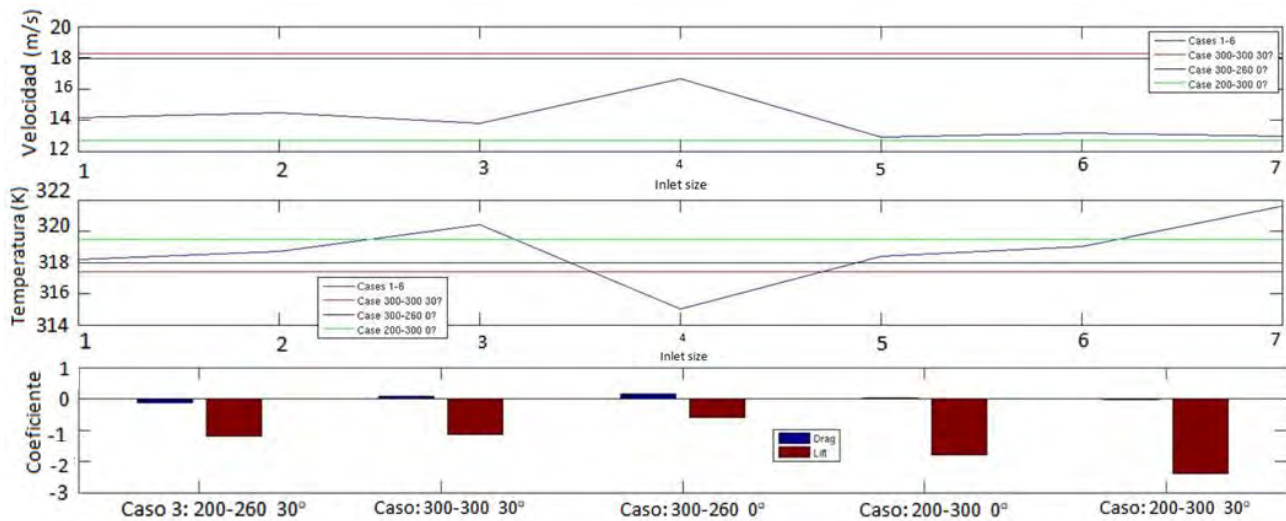


Figura 7.37: Cálculo de alturas de pontón [FUC3M].

La primera gráfica va relacionada con la velocidad media justo a la salida del pontón, lo que buscamos es la mayor velocidad posible, ya que a más velocidad, el aire que incide sobre el difusor genera más carga, sin embargo, se debe tener en cuenta que no es un parámetro esencial, sino más bien un parámetro de control. De ahí que los resultados obtenidos no se utilicen para la selección de las dimensiones. Sí tendremos más en cuenta la siguiente gráfica, la de Temperatura en Kelvin, ya que a mayor temperatura mayor es la transferencia de calor del radiador al aire, por tanto tendremos menos problemas de refrigeración y en este caso, sí que es el caso 7 el que mejor funcionaba, pues la temperatura que alcanzaba rondaba los 319K. Como se puede observar en el último de los gráficos el caso con una entrada de 200 y salida de 300mm (caso 7) es la combinación que mayor “*Lift*” genera, y un nivel de “*Drag*” de los más bajos. De modo que seleccionamos dicha combinación de alturas para la realización de los pontones en 3D.

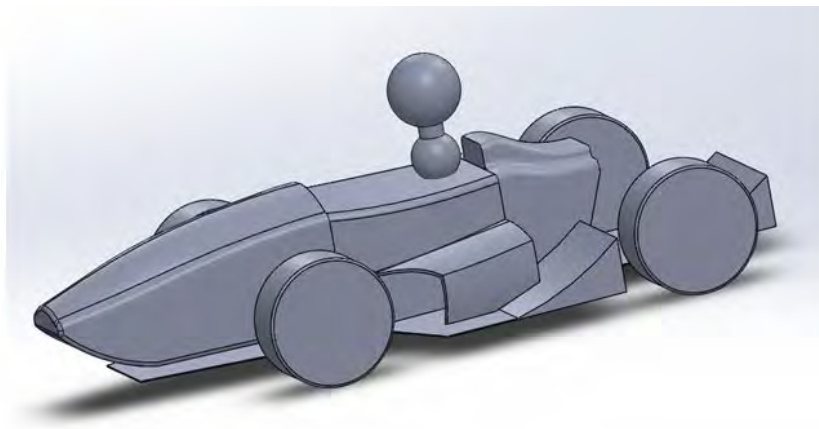


Figura 7.38: Ensamblaje con pontones rectos.

En primer lugar realizamos el pontón como el año anterior, con una curvatura de 90° de esta manera su fabricación se podría realizar a partir de una lámina y su posterior pliegue. Ahorraría tiempo en moldes y manufacturación. A continuación realizamos la simulación con dichos pontones, ver Figura 7.38.

Los resultados obtenidos tras la simulación en calidad “*medium*”, son los siguientes.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Difusores a 25° y lim.	0.18230	-0.46183	-0.00039
Carrocería Def.	0.17069	-0.20438	-0.00381
Total	0.66260	-0.65169	0.01421

Tabla 7.14: Valores de ensamblaje definitivo con pontones rectos.

Si comparamos los resultados con la Tabla 7.11, observamos cómo el “*Drag*” que perdemos en el fondo y difusores, lo aumentamos en la carrocería, manteniendo los valores de “*Drag*” muy parejos, con o sin pontones. Sin embargo los valores de “*Lift*” sí que se han visto afectados. Debido a que al añadir los pontones se ha cortado en parte el flujo de aire que circulaba a los difusores, con pequeñas turbulencias generadas por el corte de los perfiles del pontón, de esta manera que el “*Lift*” de la carrocería se vea afectado, al igual que en el fondo. Para mejorar este aspecto, se va a modificar la forma del pontón para facilitar la circulación del aire, y dirigirla de una manera más limpia a los difusores laterales. Para ello se le añade una ligera curvatura en la zona inferior del pontón, de manera que dirija el flujo de aire desde el frontal del pontón, es decir, el flujo de aire que se introduce de forma parcialmente directa entre la rueda y la carrocería conducirlo a través de la base del pontón a los difusores laterales. Para ello la curvatura no debe de ser muy brusca, evitando que se despegue la capa de aire. Tras numerosas pruebas con curvaturas diferentes, obtenemos una opción con resultados muy competitivos y con una ligera opción a mejora. El ensamblaje realizado es el siguiente, ver su vista frontal 7.39 y la Figura 7.40.

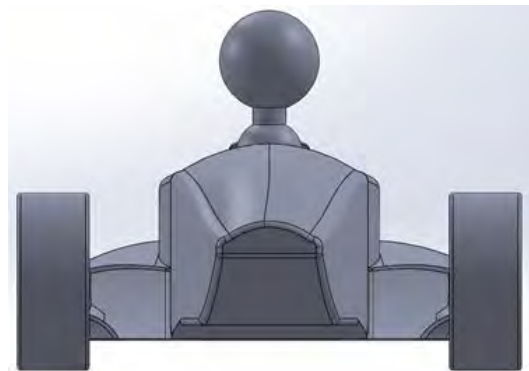


Figura 7.39: Vista Frontal del ensamblaje con pontones con curvatura.

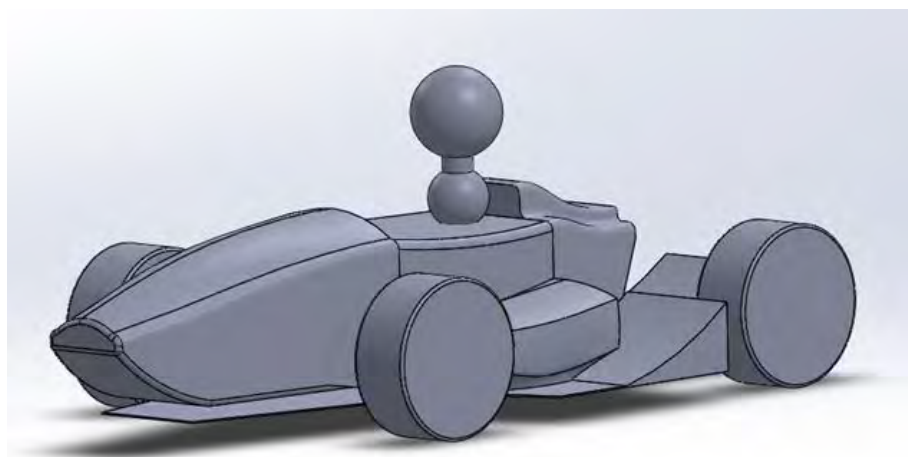


Figura 7.40: Ensamblaje con pontones con curvatura.

Como se puede observar en la Figura 7.40, la zona inferior del hueco del pontón se ha visto reducida, dejando una parte del pontón exterior al descubierto, visto desde esta vista frontal. El flujo de aire que circula por esa pequeña sección del pontón exterior, es dirigida a través de la curva al difusor lateral a una velocidad mayor, aumentando así el “*Lift*” generado por el difusor. Como observamos en la siguiente tabla 7.15.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Difusores a 25° y lim.	0.19647	-0.55179	-0.00051
Carrocería Def.	0.16442	-0.20081	-0.00409
Total	0.67978	-0.67119	0.00077

Tabla 7.15: Valores de ensamblaje definitivo con pontones curvos.

Como podemos observar los valores de “*Drag*” se mantienen prácticamente iguales, sin embargo observamos como el “*Lift*” aumenta. Gracias a lo mencionado anteriormente, ese flujo de aire que circula pegado a la curva exterior de los pontones e incide con mayor velocidad en los difusores. Unas de las posibles mejoras que podemos realizar a este ensamblaje es la de disminuir los valores de “*Drag*”. Para disminuir dichos valores, podremos modificar dos características del monoplaza. Dichas modificaciones se han realizado, gracias al estudio previo de la evolución aerodinámica de los F1, ya que no se puede observar el movimiento del flujo del aire en todo el monoplaza, tan sólo podemos realizarlo en los planos de sección preseleccionados en la simulación. A continuación enunciaré los posibles problemas que se están dando y las soluciones propuestas, posteriormente simularemos el nuevo ensamblaje para comprobar los resultados.

Uno de los posibles problemas que se pueden estar dando, es que la sección frontal que se crea entre el final del neumático y la curvatura inferior del pontón sea demasiado pequeña, esto crea que el flujo que circule por dicha zona se acelere, si la aceleración es excesiva, puede llegar a separarse de la curvatura del pontón creando vórtices. Para disminuir la velocidad de entrada de dicho flujo, aumentaremos la sección creada entre la parte interior del neumático y la curvatura de la zona inferior del pontón, de esta manera provocaremos que el flujo de aire circule más lento y pegado a la curvatura, incidiendo en el difusor lateral la mayor cantidad de flujo posible.

Otro de los problemas que se puede estar dando a causa de la velocidad de flujo y el despegue del mismo es que dicho flujo se dirija por el lateral del fondo plano sin llegar al difusor, lo que provocaría la unión de diferentes flujos a diferentes velocidades, creando vórtices a los laterales del monoplaza. Para evitar la posible pérdida de flujo de aire en la zona superior del fondo plano, situaremos un deflector lateral.

Modificados los dos puntos mencionados anteriormente, comprobaremos si logramos bajar el nivel de “*Drag*” del monoplaza. Como consecuencia de esa disminución de velocidad generada al aumentar la sección del área, también veremos afectado ligeramente los valores de “*Lift*”. La simulación del nuevo monoplaza, ver Figura 7.41, se realizará en calidad “*medium*”. A continuación se mostrarán también los resultados obtenidos en la Tabla 7.16.

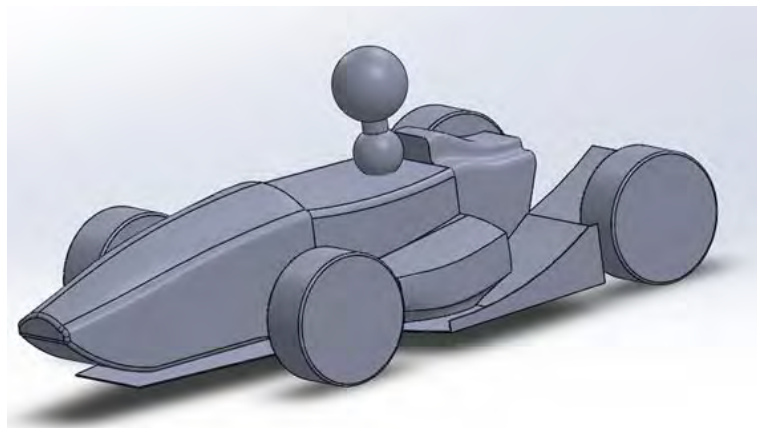


Figura 7.41: Ensamblaje con pontones con curvatura modificados.

Superficie	Coef. de Drag	Coef. de Lift	Coef. Cruzado
Difusores a 25° y lim.	0.16483	-0.43818	-0.00255
Carrocería Def.	0.15477	-0.17297	-0.00591
Total	0.62687	-0.65065	0.00077

Tabla 7.16: Valores de ensamblaje definitivo con pontones curvos modificados.

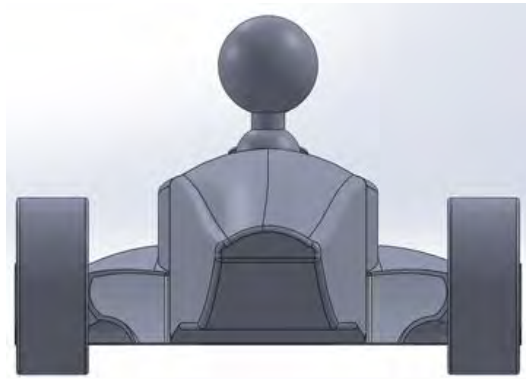


Figura 7.42: Vista Frontal del ensamblaje con pontones con curvatura modificados.

Como se puede observar en la Tabla 7.16, se ha conseguido disminuir los valores de “*Drag*” y como se adelantaba antes de la simulación, también disminuirían, en menor manera, los valores de “*Lift*”. A pesar de ello, se han conseguido unos valores aerodinámicos realmente competentes, contando con que generalmente el paquete de carrocería no suele generar tanto “*Lift*”. Ya que son los alerones los encargados de la mayor parte de “*Downforce*”.

No se debe olvidar que el objetivo del paquete aerodinámico del monoplaza es la de obtener carga aerodinámica que lo pegue al suelo, cuanto mayor sea la carga aerodinámica vertical (“*Lift*”), mayor será la adherencia en curvas.

La eficiencia aerodinámica del vehículo la evaluamos observando la relación entre la sustentación (“*Lift*”) y la resistencia (“*Drag*”), de tal modo que cuanto mayor sea este cociente, mayor eficiencia aerodinámica, como se define en la ecuación 7.1.

$$E_{ff} = \frac{C_l}{C_d} \quad (7.1)$$

El cálculo de la eficiencia aerodinámica se ha empleado a lo largo de todo el trabajo para corroborar las elecciones de cada uno de los elementos. En primer lugar el cálculo de la eficiencia en los difusores sirvió para seleccionar que la longitud de los difusores debía de ser la longitud límite. La eficiencia de los difusores de 15° con la longitud de 300mm y 350mm era de -0.64511, mientras que si se alargaban los difusores hasta la longitud límite, su eficiencia aumentaba más del doble, alcanzando los valores de -1.4427. De este modo se aumentaron las inclinaciones de los difusores y se compararon entre ellos utilizando la longitud límite, éstos fueron los resultados de sus eficiencias.

Como se puede comprobar en la Tabla 7.17, el difusor de 25°, es el que posee una eficiencia mayor, de -1.7683. Siendo los difusores utilizados para el ensamblaje final.

Inclinación	Eficiencia
15	-1.4427
20	-1.6270
25	-1.7683
30	-1.4582
35	-1.5227

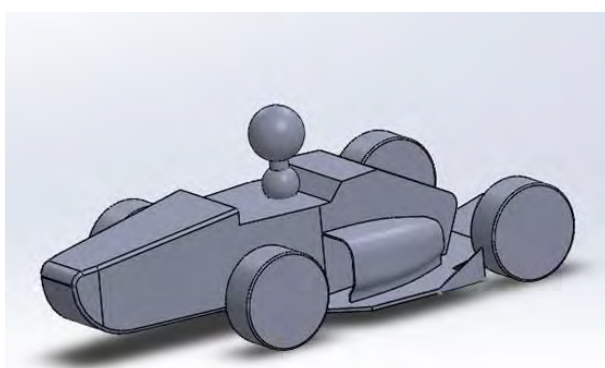
Tabla 7.17: Valores de eficiencias de los diferentes difusores.

Para la selección del ensamblaje final también se tuvo en cuenta el coeficiente de eficiencia aerodinámica, realizándose a los diferentes ensamblajes, en concreto se realizó, en aquellos con pontón. Facilitando la selección de curvatura de la zona inferior del pontón. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

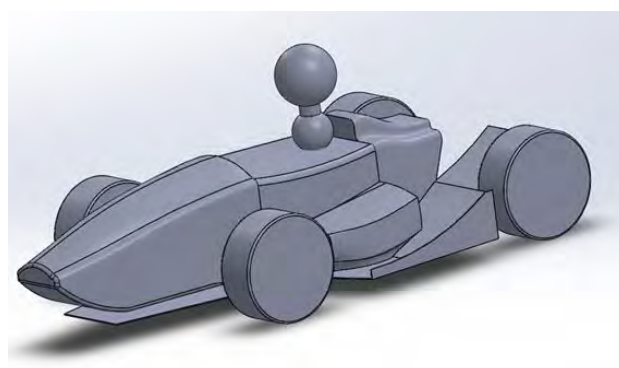
Ensamblaje	Eficiencia
Con Pontón Recto	-0.9835
Con Curvatura 1	-0.9873
Con Curvatura 2	-1.0379

Tabla 7.18: Valores de eficiencias de los diferentes ensamblajes.

De nuevo, como podemos comprobar el ensamblaje definitivo es aquel que posee la mayor eficiencia, el ensamblaje con curvatura 2, ver Figura 7.39. Compararemos la eficiencia conseguida del monoplaza definitivo, tanto con el ensamblaje inicial que utilizamos como base de mejora y a continuación realizaremos la misma comparación de eficiencias, pero en este caso con el ensamblaje de la carrocería del año pasado, sin los alerones.



(a) Diseño CAD de monoplaza base.



(b) Ensamblaje con pontones definitivos.

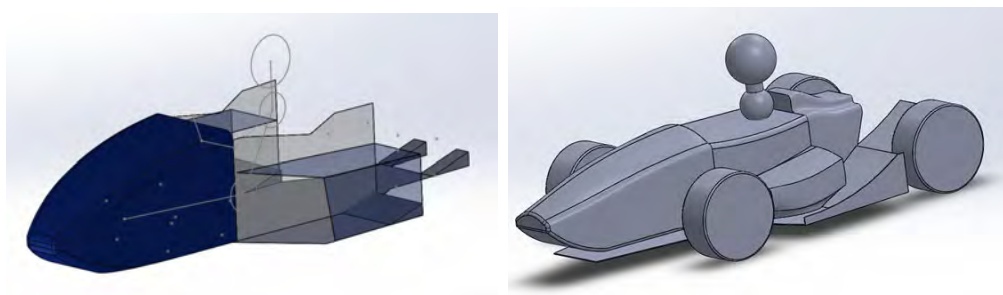
Figura 7.43: Comparativa de eficiencias entre ensamblaje base y definitivo.

Ensamblaje	Eficiencia
Base	-0.1221
Definitivo	-1.0379

Tabla 7.19: Valores de eficiencias de los diferentes ensamblajes.

La Tabla 7.20 nos refleja el aumento de eficiencia conseguido en la optimización del diseño de la carrocería base. Consiguiendo un aumento del 749.97 %. Una mejora considerable que refleja el trabajo y estudio de la aerodinámica.

A continuación realizaremos la misma comparativa de eficiencias aerodinámicas, pero esta vez compararemos el ensamblaje definitivo desarrollado en este trabajo, con la carrocería definitiva del año pasado, la competidora en Formula Student Spain 2016.



(a) Diseño CAD de monoplace 2016.

(b) Ensamblaje con pontones definitivos.

Figura 7.44: Comparativa de eficiencias entre ensamblaje 2016 y definitivo.

Ensamblaje	Eficiencia
2016	-0.7106
Definitivo	-1.0379

Tabla 7.20: Valores de eficiencias de los diferentes ensamblajes.

La mejora de la eficiencia respecto a la carrocería del año pasado es superior al 46 %. Concluyendo de manera muy favorable la optimización de la carrocería y convirtiéndola en una posible candidata a ser carrocería en los próximos años.

Para la realización de todos los cálculos del capítulo se ha utilizado el aire como material fluido, con los siguientes valores:

Densidad	1.225 kg/m^3
Viscosidad Dinámica	$1.8\text{e-}005 \text{ kg/m-sec}$

Tabla 7.21: Propiedades del aire.

Capítulo 8

Procesos de Fabricación:

En el siguiente capítulo describiremos los procesos de fabricación a seguir para realizar las diferentes piezas del carenado, así como las piezas que se han realizado con dicho procedimiento y los materiales empeñados con sus respectivas características.

Para la siguiente descripción me he basado en los conocimientos adquiridos en la empresa Fidamc [7] durante la realización del carenado del Formula Student de la temporada 15/16.

El siguiente capítulo servirá de guía para los futuros integrantes que se encarguen de la fabricación. Se encuentra dividido en dos apartados, que definen los dos procesos de fabricación utilizados.

8.1. Automated Tape Laying Equipment, (ATL):

Las máquinas de ATL (máquina de encintado automático) se utilizan para encintar superficies generalmente planas o con unas curvaturas muy pequeñas con cinta pre-impregnada unidireccional. También dispone de un cabezal auxiliar de corte, llamado Panex, con el que puedes cortar las piezas tras el laminado. Las fibras pre-impregnadas se diferencian de la fibra seca, como su propio nombre indica, en que se encuentran ya impregnadas en resina. Como veremos a continuación, en su proceso de fabricación no es necesario la adición de más resina.

El funcionamiento de la máquina en sí es muy sencillo, como hemos mencionado anteriormente tiene dos cabezales diferentes, el primero en forma de rodillo con el que coloca y presiona de manera uniforme la lámina de prepeg (pre-impregnadas) en la dirección establecida y finalmente una vez laminada toda la pieza con sus diferentes direcciones, el otro cabezal (Panex), que no es otra cosa que una cuchilla muy afilada y unas muy buenas propiedades físicas, corta todo el laminado con la forma definitiva.



Figura 8.1: Máquina ATL [7].

La máquina de ATL la utilizaremos para las piezas planas del carenado, en nuestro caso para la fabricación del fondo plano y los carenados por una parte, y el suelo estructural por la otra. Debido a que éstas poseen diferentes número de capas y distribuciones de las mismas.

En primer lugar la empresa diseña con un programa personalizado para la máquina que se dispone, el cual genera un archivo .tnc, donde se introduce la forma final de la pieza y el número de capas junto con sus direcciones. En dicho programa se pueden señalar también los comienzos y finales de cada lámina colocada por el útil, consiguiendo así un ahorro considerable de material, pues fuera de pieza no es necesario el mismo número de capas.

En nuestro caso se realizarán en dos programas diferentes las piezas, por una parte se realizará el fondo plano y los carenados, ya que éstos al no ser parte estructural del coche, sólo se necesitarán 6 capas aproximadamente para su realización, el número de capas es orientativo, pero se estimaron suficientes para la rigidez requerida y facilitar los post-procesos de fabricación como la realización de taladros o cortes en las mismas.

En el caso del suelo estructural que como su propio nombre indica, sí que forma parte de la estructura del coche y tiene un papel fundamental en la resistencia estructural del cockpit, se emplearon un total de 27 capas, éstas podrán variar en función del diseño realizado, pero siempre rondarán estas cantidades pues deben aguantar grandes cargas en las comprobaciones estáticas.

A continuación observaremos las diferentes tablas en las que se muestran las diferentes disposiciones del fondo plano, carenados y suelo estructural.

En primer lugar observamos la tabla 8.1 en la que se muestran las diferentes disposiciones de la fibra para los carenados laterales y el fondo plano:

Número de capa	Orientación
1	+45
2	-45
3	0
4	0 (refuerzo)
5	-45
6	+45

Tabla 8.1: Disposición de fibras en carenados laterales y fondo plano.

La disposición de las fibras en el suelo estructural es la siguiente:

Número de capa	Orientación
1	+45
2	-45
3	90
4	0
5	0
6	0
7	+45
8	-45
9	90
10	0
11	90
12	90
13	0
15	0
16	90
17	90
18	0
19	90
20	-45
21	+45
22	0
23	0

Sigue en la página siguiente.

Número de capa	Orientación
24	0
25	90
26	-45
27	+45

Tabla 8.2: Disposición de fibras en suelo estructural.

Una vez realizados los programas e indicadas las orientaciones, se ha de preparar el aprovisionamiento de material, en este caso será fibra de carbono pre-impregnada unidireccional, en concreto el M21 T800 con un espesor de 0.184 mm. Que la fibra de carbono sea unidireccional significa que sus fibras no se encuentran entrelazadas, sino que todas las fibras se encuentran orientadas horizontalmente. El motivo de utilizar fibra unidireccional y no fibra entrelazada, no fue basado en aspectos técnicos, sino que fue la fibra que nos facilitó Fidamc [7].

Posteriormente limpiaremos el útil de curado y se aplicará un desmoldante, en nuestro caso hemos utilizado el A4000, que es un film desmoldante con alta elongación, para curas de hasta 260°C. Con un acabado muy liso, que será trasladado a la superficie de nuestras piezas.

Una vez lista la mesa con el A4000, ejecutaremos el programa con la máquina ATL, en primer lugar irá depositando las diferentes láminas siguiendo las direcciones especificadas por el programa, una vez alcanzado el número de láminas especificado el Panex cortará el panel con la forma final. Tras el corte sólo queda separar las fibras sobrantes con cuidado repasando los cortes con un cúter en caso de ser necesario.

Realizaremos el mismo procedimiento tanto para el suelo como para los carenados y fondo plano.

Una vez obtenidas las formas definitivas debemos realizar el proceso de curado para que obtengan las propiedades requeridas por el diseño. En este caso el curado se realizará en el autoclave. Para ello debemos realizar el siguiente procedimiento:

En primer lugar debemos acondicionar el panel grande del autoclave, pues todas las piezas se introducirán en el mismo ciclo. El acondicionamiento del panel consiste en la limpieza del mismo con acetona para evitar la intrusión de materiales no deseados.

Como observaremos a continuación las piezas poseen el borde más claro que el resto de la pieza. Esto es debido a que para facilitarnos posteriormente la manipulación de las piezas, siendo necesarios algunos cortes y taladros, hemos situado en las zonas de los posibles orificios una capa de fibra de vidrio, de esta manera conseguiremos que no se astille la pieza. Para ello previamente hemos debido atemperarlo para que recupere su maleabilidad, pues éste se conserva en neveras para evitar que pierda sus propiedades.

También forramos algunos sobrantes para poder practicar el taladro previamente. A continuación en la Figura 8.2 observamos el resultado del conformado final realizado con el ATL, previo a la fase de curado.

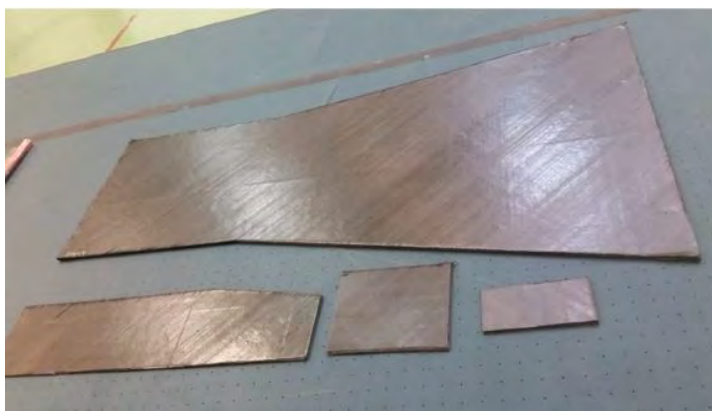


Figura 8.2: Suelo estructural y retales conformados con ATL [7].

Una vez colocados todos en el panel del autoclave colocaremos corcho perimetral alrededor del laminado, de esta manera evitaremos que la resina se expanda por el exterior de la pieza. Posteriormente, colocaremos una capa de A4000 para obtener el mismo acabado liso por ambas caras. En la siguiente Figura 8.3 se observan las piezas con el corcho perimetral creando la forma de la pieza. También se observa de color blanco la fibra de vidrio colocada como hemos mencionado anteriormente para facilitar el taladrado y por último por encima se observa el film desmoldante A4000.

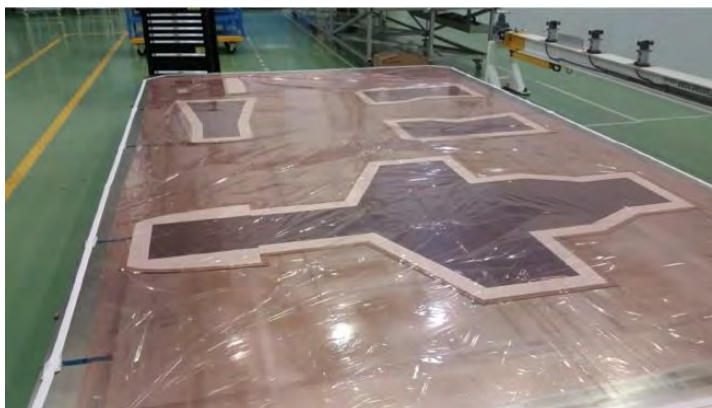


Figura 8.3: Piezas con corcho perimetral y ambas capas de A4000 [7].

A continuación realizaremos la bolsa de vacío con las especificaciones realizadas por el taller. En las cuales el esquema de la bolsa de vacío es el que se muestra en la Figura 8.4.

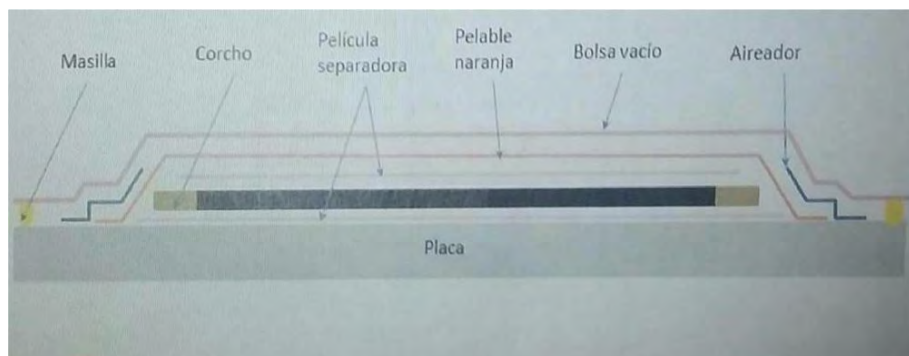


Figura 8.4: Esquema bolsa de vacío [7].

Hasta el momento tenemos colocadas las dos películas separadoras y el corcho, de modo que a continuación colocaremos el pelable naranja, en nuestro caso utilizamos yenil (ver Figura 8.5), es un material muy absorbente que se encarga de recoger todos los excesos de resina que posee la pieza.



Figura 8.5: Lámina de Yenil

Tras la colocación del yenil a lo largo del panel debemos colocar la película separadora de Airtech (WL5200), más conocido como "*Air weave*", lo que permite la circulación de aire entre las piezas a la hora de realizar el vacío y evitar posibles colapsos que puedan causar la rotura de la bolsa. En la Figura 8.6 podemos observar la disposición del "*Air weave*" alrededor de las piezas.



Figura 8.6: Disposición del “*Air weave*” [7].

Sobre el “*Air weave*” situaremos las tomas donde se aplicará el vacío, en nuestro caso realizaremos 3 tomas de vacío y 3 registros, las cuales situamos en las esquinas y en el centro superior e inferior del panel. También se colocaron termopares, 1 en una esquina de las piezas y 2 termopares al útil. Mediante los registros podremos controlar la situación del vacío durante el proceso de curado. Los termopares sin embargo se utilizan como sensores de temperatura.

Una vez colocado todo colocamos el film de la bolsa de vacío y sellamos el contorno con masilla selladora. Realizado esto le realizamos la prueba de estanqueidad, en la que la pérdida no podía ser mayor de 10mmHg en 10 minutos. Una vez confirmado el funcionamiento de la bolsa se le aplica todo el vacío de la red un total de 650mmHg, obteniendo un resultado como el siguiente.



Figura 8.7: Vacío realizado [7].

Una vez realizado el vacío se introduce a un ciclo en el autoclave, en el cual como estaban realizando a la par probetas de diferentes experimentos de la empresa, desconocemos los valores empuñados, pero nunca mayores a 260°C , pues perderíamos el A4000.

Tras el curado, retiramos la bolsa y el corcho perimetral, obteniendo las piezas tal y como se muestran en las siguientes Figuras.

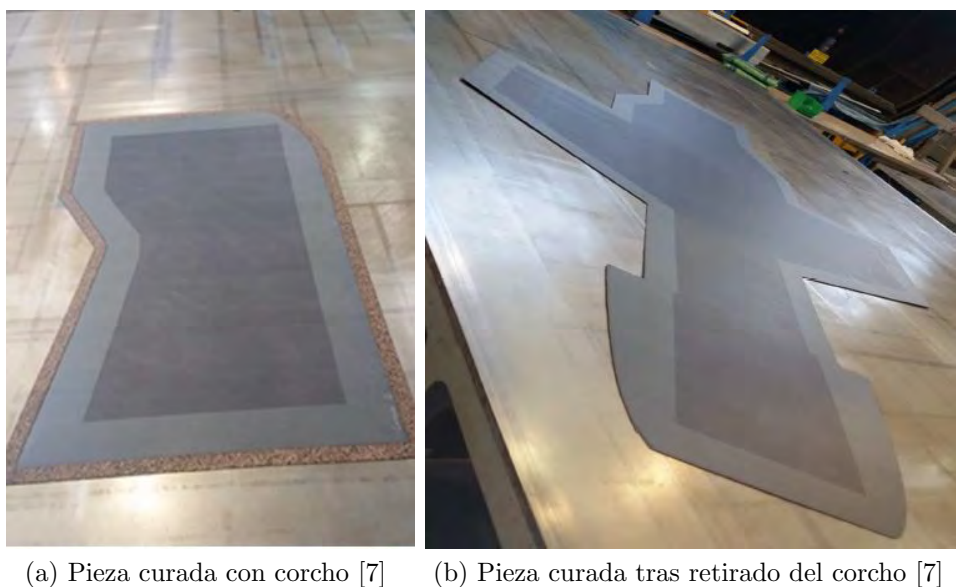


Figura 8.8: Piezas tras el curado.

Como hemos mencionado anteriormente el corcho perimetral se utilizaba para evitar que la resina desbordase de la pieza. Por consiguiente, tras el desmoldeo debemos realizar el rebarbado de los paneles, pues en las zonas en las que el corcho no se ha quedado completamente pegado a la pieza se han producido excesos de resina como los que se pueden observar en la Figura 8.9.



Figura 8.9: Exceso de resina [7].

Con el rebarbado de los paneles también eliminamos todo el corcho adherido a la pieza. Una vez finalizado ya tenemos las piezas definitivas.

8.2. Método Húmedo:

Los materiales que han sido necesarios para la realización del método húmedo han sido los siguientes. Por una parte, para la realización del molde hemos utilizado espuma extruida y masilla para espuma extruida. Mientras que para la realización de las piezas definitivas se ha utilizado fibra de carbono seca con un tipo de tejido llamado “Tafetan” y las resinas utilizadas son el Araldyte LY 5052 y el Aradur 5052 CH.

En primer lugar comentaré la realización del molde, en el cual a partir del diseño CAD, realizamos una serie de secciones al diseño y las imprimimos a tamaño real. Estas secciones las pegamos a las planchas de espuma extruida y recortamos los sobrantes. Pegamos con un pegamento especial para espumas las caras de las planchas entre sí, obteniendo la forma final del morro de una manera escalonada, sin ningún redondeo. Para realizar los redondeos, barajamos varias posibilidades como el desbaste por hilo caliente, que fue rechazado por su escasa precisión, utilizando finalmente un cuchillo jamonero bien afilado con el cual cortamos los sobrantes. Posteriormente lijamos el molde hasta obtener las curvaturas deseadas.



Figura 8.10: Realización del redondeo del morro

Se fabricaron los moldes de los siguientes componentes; del morro y de los difusores, tanto de los laterales como del trasero. En la Figura 8.10 se puede ver lijando el molde del morro, para conseguir la curvatura deseada.

Una vez realizado el molde de espuma, realizamos el patronaje de las capas de carbono, en un primer momento realizamos los patrones para el morro en plástico, de este modo nos facilitaríamos el trabajo en la realización de las pestañas necesarias para evitar la creación de arrugas y realizar un correcto solapado entre capas, evitando que éstos coincidan en el mismo lugar. La realización de dichas plantillas de los patrones en plástico evitó a su vez el posible desperdicio de material de fibra de carbono en caso de error. Los patrones se dividieron en un gran patrón frontal y dos caras laterales. Realizando así cuatro patrones de la parte frontal ordenados de mayor a menor y de igual manera para los laterales. Una vez comprobados en el molde los patrones de plástico, observando que no se generaran muchas arrugas, procedemos a la realización de esos mismos patrones, pero ya en la fibra de carbono.

Antes de la disposición de las fibras sobre el morro, forramos el molde con un material llamado “*tool-tec*”. Es un material adhesivo con un acabado muy liso, que se adhiere al molde, evitando que la resina que se impregnará posteriormente cale en la espuma y al desmoldar se desprendan partes del molde. De este modo podremos volver a utilizar el molde para hacer una segunda pieza, en nuestro caso realizamos un morro extra de fibra de vidrio. Una vez aplicada la capa de “*tool-tec*” el resultado que obtenemos es el que se observa en la siguiente imagen (ver Figura 8.11).

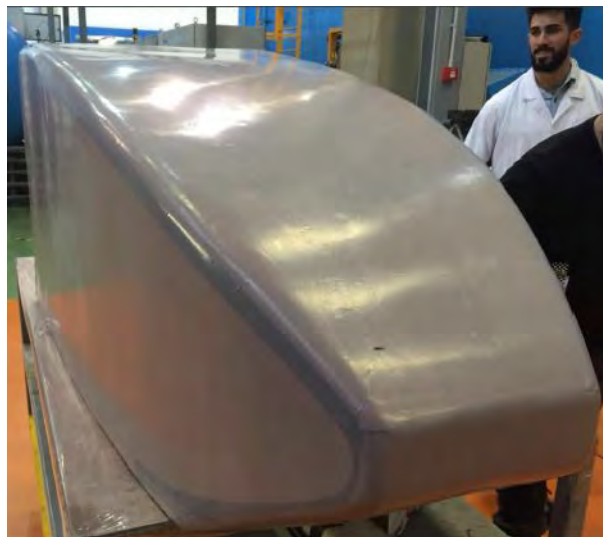


Figura 8.11: Molde recubierto con capa de “*tool-tec*” [7].

Una vez protegido el molde le impregnamos una primera capa de resina, para todas nuestras piezas hemos utilizado un kit formado por una base llamada Araldite LY 5052 y un catalizador llamado Aradur 5052 CH, con una proporción de 300g y 114g respectivamente. En esta primera capa, para realizar una resina más resistente y conseguir que agarre mejor, hecho que facilitará mucho la colocación de las siguientes capas, pues no se moverá al desplazar las siguientes, hemos vertido un par de cucharadas de Aerosil, que es un espesante formado por micro-esferas de vidrio.

Tras la primera mano de resina sobre el “*tool-tec*” colocamos la primera capa de fibra de carbono, la cual con ayuda de un rodillo impregnamos con resina, a su vez recortamos los filamentos sobrantes de las capas, pues al endurecerse con la resina, estos actúan como agujas pinchando la bolsa de vacío. Como hemos mencionado anteriormente, para facilitar la colocación de las siguientes capas, dejamos curar la pieza un día para que ésta se fijara bien al molde, consiguiendo una base de carbono consistente.



Figura 8.12: Extendiendo la resina y recortando bordes sobrantes [7].

Realizadas las 4 capas y habiendo retirado el mayor número de arrugas posible, le colocamos una capa de yenil (ver Figura 8.13), ya mencionado anteriormente, para que absorba los excedentes de resina tras el vacío. Esta acción se realiza tanto para el morro como para los difusores.

Situado el yenil evitando de nuevo todas las arrugas posibles, conseguiremos un muy buen acabado en la zona exterior de la pieza. Para fijarlo, utilizaremos cinta de carroceros, pegada ésta siempre fuera de pieza para evitar que se señale al realizarse el vacío.



Figura 8.13: Colocando el yenil al difusor [7].

Para la realización de la bolsa de vacío realizaremos el mismo proceso que para el ATL. En primer lugar recortamos un trozo lo suficientemente grande de plástico de bolsa de vacío para envolver la pieza. Una vez comprobado que es lo suficientemente grande, se sella con masilla los bordes libres, quedando una única arista libre por la cual meteremos la pieza.

Colocada la pieza dentro de la bolsa, se le colocará una lámina de “*air weave*” en la parte inferior de la pieza, para que ésta permita el paso de aire evitando el colapso de la bolsa, también sobre ella situaremos la toma de vacío. En todos los casos hemos colocado una sola toma de vacío.

Finalmente se sella la arista que faltaba con la masilla y le aplicamos el vacío. Para evitar la rotura del molde, se realizan pequeñas perforaciones en la bolsa, consiguiendo que la carga de vacío no sea tan elevada.



(a) Morro con vacío.

(b) Difusores con vacío.

Figura 8.14: Morro y difusores con el vacío realizado [7].

Las piezas se curan a temperatura ambiente durante un día, tras el curado se les retira la bolsa. Es necesaria una mano de lija con una orbital, para retirar las arrugas creadas tras el vacío.

Para rellenar los huecos producidos por la falta de capas en algunas zonas o las imperfecciones producidas por la bolsa de vacío, se realiza un poco de resina mezclada con Aerosil, en este caso la cantidad de base y catalizador fue mucho menor, pues con la ayuda del Aerosil lo que se pretende conseguir es una mezcla pastosa con suficiente cuerpo como para mantenerse en la zona deseada sin verterse. Para que dicha masilla adquiriera el color del carbono, y no el color blanco propio del Aerosil, se depositan polvos de carbono, obteniendo así un color más oscuro y a su vez espesa más la mezcla. Tras la capa de masilla con ayuda de una espátula se busca conseguir un acabado liso, sin embargo para perfeccionar el acabado, se deja curar de nuevo la masilla y una vez seca, se da otra pasada con un disco fino de orbital.

Una vez realizadas las piezas, se realizan sobre ellas todos los taladros y cortes necesarios para su implantación en el monoplaza. Comprobado que cada una de las piezas encaja perfectamente en su posición, posteriormente se envían al taller de pintura de nuestros patrocinadores “Mercedes Benz Madrid [80]”. Donde se pintaron, quedando un resultado como el que podemos observar la Figura 8.15.



Figura 8.15: Formula UC3M personalizado por Mercedes Benz-Madrid [80].

8.3. Innovación en fabricación:

En la fabricación del monoplaza de la presente temporada, se han introducido estructuras de tipo *sandwich*, a continuación explicaremos en qué consisten y qué mejoras aportan.

Una vez finalizada la fabricación, se podrán comparar los resultados con los obtenidos el año pasado y podremos seleccionar el tipo de material a utilizar para la temporada 2017/2018.

8.3.1. Constitución de las estructuras tipo *sandwich*:

Las estructuras tipo *sandwich*, se han convertido en una alternativa en diferentes campos de la fabricación. Un *sandwich* estructural está constituido básicamente por tres elementos, ver Figura 8.16.

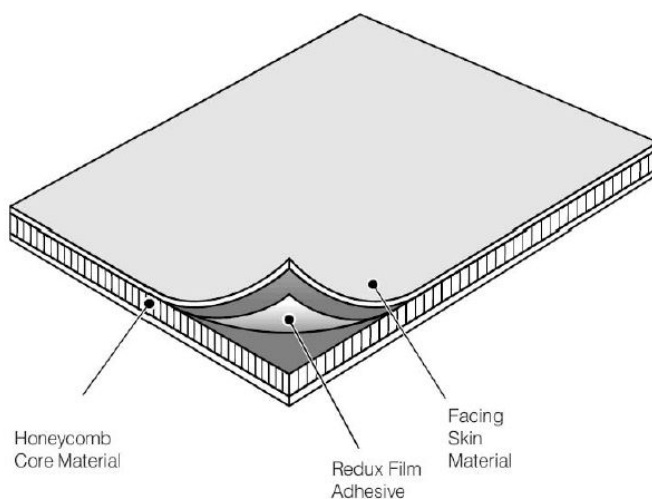


Figura 8.16: Estructura tipo *sandwich* [86].

- **“Facing Skin Material”**: En nuestro caso utilizaremos fibra de carbono entrelazada, como la mencionada anteriormente en el capítulo.
- **“Redux Film Adhesive”**: A la hora de pegar las fibras con la espuma, se pueden seguir diferentes caminos, como se muestra en la Figura 8.16, con una lámina de adhesivo, otra manera es la adición de una capa de resina entre fibra y espuma y por último si las fibras utilizadas son del tipo pre-preg, se pegarán con la propia resina de las fibras. Este componente adhesivo debe ser capaz de transmitir cargas axiales y de cortadura entre las partes que une.

- **“Honeycomb Core Material”** : Como se puede apreciar en la imagen, el tipo de espuma utilizada es del tipo “Honeycomb”, se conoce por los pequeños paneles, en nuestro caso se ha utilizado EasyCell75, más adelante se explicarán sus características. El núcleo grueso y ligero que separa las fibras, aporta estabilidad y posee la misión de transmitir, mediante cortadura, acciones mecánicas de una fibra a otra.

Los espesores de cada uno de los componentes, deben de comprenderse entre ciertos límites.

$$10 \leq \frac{t_n}{t_f} \leq 100 \quad (8.1)$$

- **tn**: Espesor de núcleo.
- **tf**:Espesor de fibras.

La estructura tipo *sandwich* está diseñada de manera que sean las fibras las encargadas de absorber los esfuerzos de flexión y cargas aplicadas en el plano. Proporcionan prácticamente la totalidad de la rigidez a flexión del conjunto. El núcleo de espuma separa las fibras entre sí, para aumentar la inercia a flexión y soportar los esfuerzos a cortadura. Al aumentar la distancia entre fibras, se obtiene un aumento cúbico de la rigidez a flexión. Como se puede observar en la ecuación 8.2, a continuación.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (8.2)$$

- **D**: Rigidez flexional.
- **E**: Módulo de Young del material de la placa.
- ν : Coeficiente de Poisson del material de la placa.

8.3.2. Ventajas e inconvenientes de la estructura tipo *sandwich*:

8.3.2.1. Ventajas del uso de la estructura tipo *sandwich*:

- Posee excelentes propiedades de rigidez y resistencia específica frente a cargas de flexión.
 - Buena resistencia a fatiga.
 - Resistencia a impactos.
-

- Obtención de superficies lisas y suaves.
- Elevado aislamiento térmico y eléctrico.
- Con la aplicación de calor se consigue una gran versatilidad a la hora de diseño.
- Con el aumento de rigidez otorgado por la espuma, se consigue ahorrar gran cantidad de capas de fibra y por consiguiente ahorro económico. A su vez la densidad menor de la espuma frente a las fibras con resina, le aporta al componente una disminución de peso considerable.

8.3.2.2. Inconvenientes del uso de la estructura tipo *sandwich*:

- Delaminación. Tiende a separarse por cortadura o pelado de la unión entre las fibras y el núcleo. Dependerá del tipo de adhesivo utilizado.
- Concentración de tensiones en agujeros o uniones atornilladas.

8.3.3. Espuma utilizada:

El núcleo utilizado es el “*EasyCell75 Closed Cell Foam PVC*”. Son láminas de espuma de PVC de celda cerrada, con una densidad nominal de $75\text{kgs}/\text{m}^3$. Tiene un excelente rendimiento mecánico y es compatible con diferentes tipos de resina.

La estructura de células cerradas, significa que la espuma no absorbe la resina, por lo que el núcleo permanece libre de resina, reduciendo el peso y el coste de material. Este tipo de estructuras cerradas, funcionan muy bien con tratamientos de vacío como los que empleamos en nuestra fabricación.

Aquellas planchas de espesores menores, pueden ser calentadas y moldeadas para un perfecto ajuste a las formas de la pieza. Los espesores utilizados por el equipo son los comerciales de 3mm, para piezas como “*endplates*”, que con 4 capas de fibra a cada lado, son capaces de soportar 2000N de fuerza y 25mm de espuma para el cuerpo del monocasco.

El uso de este tipo de estructura, nos hubiera permitido economizar en piezas como el suelo estructural, permitiendo reducir las 27 capas utilizadas, a la mitad, reduciendo peso y costes.

Capítulo 9

Planificación:

Para una correcta realización de todo el proceso de diseño y producción de una carrocería, partiendo de cero, se requiere una planificación. Ésta, a su vez, debe estar organizada de tal manera que se optimicen los repartos de tiempo entre diseño y producción, sin solaparse, optimizando recursos.

A lo largo de este proyecto se ha trabajado en el diseño y optimización de la carrocería de un formula student para temporadas siguientes y como posible optativa al monocasco realizado este año. A su vez, introduzco la fabricación, tanto sus métodos como sus ciclos de trabajo, ya que tuve la suerte junto a otro compañero de ser los encargados de la fabricación física de la carrocería de 2016. Siendo dicha experiencia una buena base de conocimientos para optimizar diseños en función a sus métodos de fabricación. De modo que se añade en el siguiente “*Timeline*” los procesos de fabricación seguidos el año anterior, pues serán prácticamente idénticos para realizar la carrocería expuesta y una manera más realista de conocer el tiempo que requiere el proceso completo desde el papel a la vida real.

En cuanto al apartado de fabricación, la carga laboral se ha organizado en turnos de 8h de trabajo, de tal modo que cada empleado realiza un máximo de un turno al día, y puede realizar un máximo de 21h semanales (3 días laborales) evitando la fatiga que genera un proceso de fabricación tan largo.

Como se puede observar en la imagen 9.2, el “*Timeline*” se ha dividido en diferentes categorías; diseño, simulación, fabricación y ensamblaje. Se ha realizado una planificación mensual, ya que es muy difícil realizar una planificación más concreta, como por ejemplo semanal. El equipo depende de la participación de un gran número de empresas en las que en su mayoría la FSAE no es una prioridad. De modo que debemos estar sujetos a sus plazos de trabajo y maniobrar con la antelación suficiente para finalizar a tiempo nuestro proyecto.

En cuanto a las horas de fabricación se han tomado los datos de fabricación de las piezas del año anterior, eliminando los alerones, pues como he mencionado anteriormente, el diseño de las nuevas piezas se ha basado en la experiencia de fabricación de dicha carrocería, de modo que se utilizarían los mismos procesos seguidos, no variando en gran medida los ciclos de tiempo.

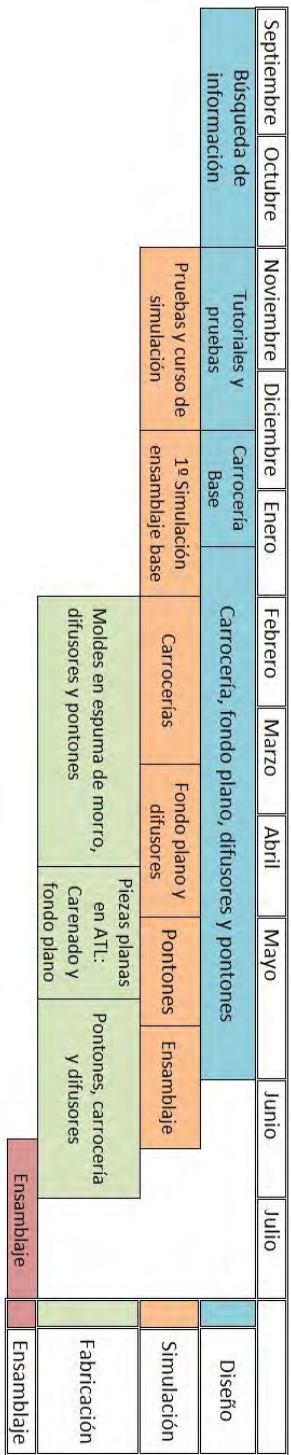


Figura 9.1: “*Timeline*” general seguido [Elavoración propia].

BASE DE CONOCIMIENTO		TOTAL HORAS
Búsqueda de información y tutoriales (Hypermesh y Virtual Wind Tunnel)	Aproximadamente 2 meses: 2h/día x 15días/mes x 2 meses	30h
Cursos sede Altair de Virtual Wind Tunnel y Hypermesh	2 sesiones x 10h/sesión	20h

DISEÑO Y SIMULACIÓN			SIMULACIONES		TOTAL HORAS
	Variantes	Horas diseño	Course	Medium	
Diseño en papel	4	5h/diseño	-		20h
Carrocería CAD	5	3h/cad	2h/cad	5h/cad	50h
Difusores + Fondo Plano	14	1h/cad	-	3h/cad	42h
Ensamblaje Base	1	5h/cad	6h/cad	8h/cad	18h
Carrocería + F.P y Difusores	3	1h/cad	5h/cad	8h/cad	42h
Carrocería + F.P y Difusores+ Pontones	4	5h/cad	6h/cad	8h/cad	76h
Conjunto de simulaciones fallidas					40h

TOTAL HORAS DE DISEÑO Y SIMULACIÓN	338h
---	-------------

FABRICACIÓN						TOTAL HORAS
Pieza	Procesos	Trabajadores	Semanas	Turnos	Horas	
Morro	Molde	4	4	2	320	467.2h
	Laminado	2	2	1	80	
	Corte	1	1/5	1/4	4	
	Preparado y pintado	3	1	2	60	
	Vinilado	1			3	
	Ensamblado	2			1/5	
Difusores	Molde	3	1	2	60	164.2h
	Laminado	2	1	1	40	
	Corte	1	1/5	¼	4	
	Preparado y la cado	3	1	2	60	
	Ensamblado	2			1/5	
Piezas Planas	Laminado	3	1	1	60	63h
	Vinilado	1			3	
Ensamblado e interferencias		3			8	24h

TOTAL HORAS DE FABRICACIÓN POR UN TRABAJADOR	218.87
TOTAL HORAS DE FABRICACIÓN	718.4h
TOTAL HORAS DE DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN DE UN TRABAJADOR	556.87
TOTAL HORAS DE DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN	1056.4h

Figura 9.2: Horas de trabajo invertidas. [Elaboración propia].

Capítulo 10

Desarrollos Futuros:

En el presente capítulo se expondrán posibles desarrollos futuros que podrán mejorar la calidad de los cálculos y su posterior post-procesado. También se ahondará en posibles mejoras en la geometría desarrollada en el proyecto y finalmente en el proceso de fabricación.

Los desarrollos futuros a trabajar pueden dividirse en los siguientes grupos:

10.1. Desarrollo en las herramientas de procesado:

10.1.1. Posibles mejoras en *Hypermesh Desktop 13.0* de Altair®:

El programa de Altair®[6], *Hypermesh Desktop 13.0* es uno de los pre-procesadores más potentes del mercado. Las capacidades que posee para reconocer las geometrías añadidas y la calidad de mallado avanzadas que posee, proporcionan un entorno óptimo para la rápida generación de modelos. A su vez, la capacidad de generar mallas de alta calidad de manera rápida (“*automesh*”) es una de las competencias básicas que lo distingue. Por el siguiente motivo se ha utilizado dicha opción a la hora de generar la malla.

Para posibles proyectos futuros con ordenadores con un procesador más potente del que se ha utilizado para la realización de dicho TFG (en el que no se aceptaban procesos con una cantidad superior al medio millón de elementos), sería interesante limitar el uso de la opción “*automesh*”. De esta manera, se podrían mallar con diferentes calidades y diferentes geometrías de malla, los diferentes componentes de la carrocería en función de su importancia. Nos referimos a mayores calidades de malla, en el momento en el que se nos da la opción de realizar el mallado con elementos menores, en nuestro caso el elemento menor utilizado era de 0.0075mm. El uso de elementos más pequeños nos permitiría ajustarnos en mayor medida a la geometría del monoplaza, obteniendo resultados más fiables. Zonas en las que se podría realizar dicha optimización de mallado, son aquellas con espesores pequeños como pueden ser los pontones, también puede ser útil en los difusores pues la utilización de unos elementos menores nos permitirían una reproducción más fiel de la curvatura y por tanto unos resultados más realistas.

Posteriormente se podría realizar una comparación de los datos adquiridos entre ambos y comprobar si las diferencias de resultados son lo suficientemente importantes como para aceptar el aumento de tiempo a la hora del cálculo.

10.1.2. Posibles mejoras en *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®:

Virtual Wind Tunnel 13.1 es una herramienta muy potente e intuitiva, de la cual se ha intentado sacar el máximo provecho en el presente trabajo. Hay pocas opciones que se puedan mejorar.

En primer lugar, como hemos mencionado anteriormente con un procesador más potente se podría realizar la simulación en calidad “*fine*” y comprobar la diferencia de resultados.

Otra de las opciones del programa que no se han utilizado y pueden ser muy útiles, es la de introducir los radiadores en la simulación. No se ha realizado porque aún no se conoce el modelo exacto que se utilizará, y por que el desarrollo de este TFG es el de un prototipo, pero para posteriores diseños en últimas etapas de diseño sería muy interesante la introducción del radiador, pues con la selección de componentes que ofrece VWT, tan solo con la selección de su cara frontal y trasera el propio programa te calcula la variación de presión.

Una de las ideas del año anterior era la de usar el túnel de viento o el de agua de la universidad para poder probar a escala componentes del vehículo. Para ello los modelos de los componentes se realizarían mediante la impresión 3D, con un tratamiento superficial para minimizar la rugosidad, al final dicha idea no se ha realizado debido a los costes de una célula de carga. Pero de ser así, sería muy interesante la comparación de datos entre el túnel de viento virtual y el real.

10.1.3. Posibles mejoras en el post-procesado:

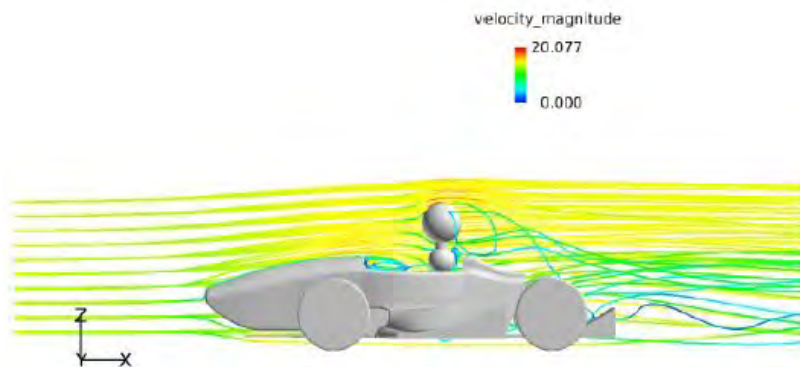


Figura 10.1: Líneas de corriente en vista de perfil.

El programa de *Virtual Wind Tunnel 13.1*, al finalizar los cálculos te genera un documento en pdf, en el cual se muestran todos los resultados obtenidos y una serie de imágenes en las que se muestran las gráficas de los coeficientes y algunas figuras del monoplaza con las líneas de corriente, como por ejemplo ver Figura 10.1.

(A lo largo del proyecto no se han utilizado dichas imágenes debido a la incompatibilidad de mi tarjeta gráfica con el soporte de Altair®[6], las siguientes imágenes han sido facilitadas por la sede de Altair®[6]), que ha simulado el archivo final. Como se observa en la Figura 10.1, el flujo de líneas de corriente tan solo se dibuja en la sección central de monoplaza. Ésto complica el estudio del flujo de corriente en las diferentes superficies que nos puedan interesar fuera de esa región, como por ejemplo el fondo plano o los pontones, quedando como único comprobante las diferencias de presión en el monoplaza, que pueden darnos una idea de la intensidad del flujo que circula a través de ellas, ver Figura 10.2.

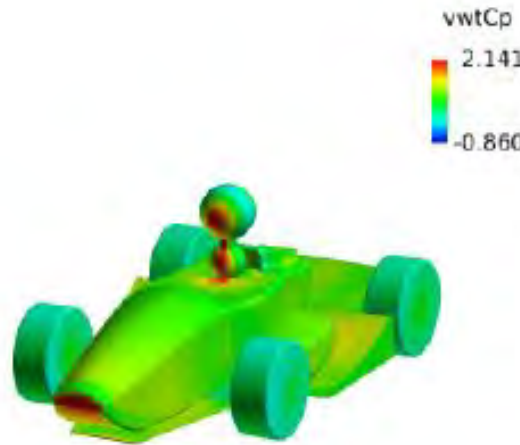


Figura 10.2: Coeficientes de presión en la superficie del cuerpo.

Para desarrollos futuros sería interesante implementar el programa de post-procesado *Hyperview* de Altair®[6], es un entorno completo de post-procesamiento y visualización para el análisis de elementos finitos, CFD y datos del sistema multi-cuerpo[6]. Para ello se debería realizar al igual que para estas dos herramientas del proyecto, una elaborada búsqueda de información y métodos de funcionamiento, algunos de los beneficios serían los siguientes:[6]

- Los usuarios pueden procesar posteriormente cualquier análisis CAE.
- Las capacidades y la velocidad de la animación de *HyperView* lo hacen ideal para trabajar con grandes modelos y archivos de resultados.
- Los usuarios pueden crear vistas de modelos personalizados, tales como cortes de sección y vistas ampliadas combinando la funcionalidad del conjunto de herramientas de post-procesamiento y la utilidad integral de HyperView.
- *HyperView* contiene *Hypergraph*, un potente paquete de trazado XY y análisis de datos que se integra perfectamente en el entorno de *HyperView*.

La utilización de dicho programa nos proporcionaría una mayor cantidad de datos y demostraciones de las teorías aplicadas, sirviendo como demostración en eventos estáticos como el *Design*, aumentando nuestras puntuaciones.

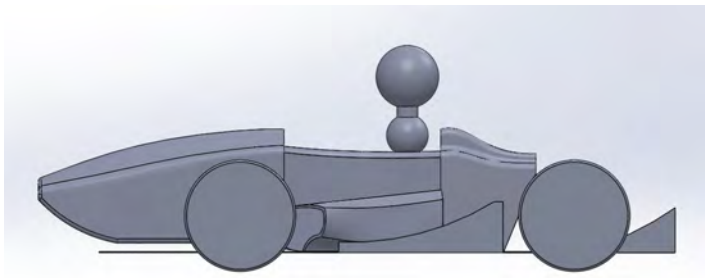
10.1.4. Comparativa con diferentes programas de cálculo:

Una vez adquiridos los conocimientos necesarios para realizar simulaciones con *Virtual Wind Tunnel 13.1*, para ocasiones futuras, sería interesante comparar los resultados obtenidos con los resultados que nos proporcionan otros programas de cálculo que se disponen en el equipo. Los programas disponibles son los siguientes:

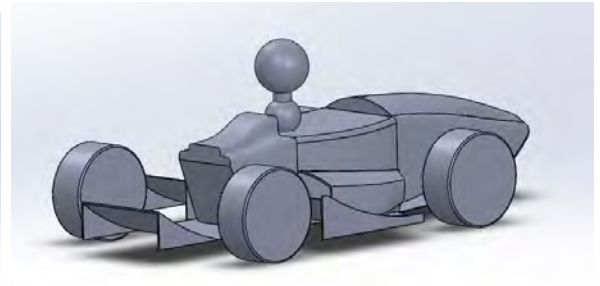
- **Fluent 17.1 de ANSYS®[84]**: La herramienta de cálculo de ANSYS®[84] se encuentra de manera gratuita en la universidad y es una de las más utilizadas por el equipo FUC3M.
- **OpenFOAM**: La utilización del programa es gratuita.

10.2. Desarrollo en la geometría del monoplaza:

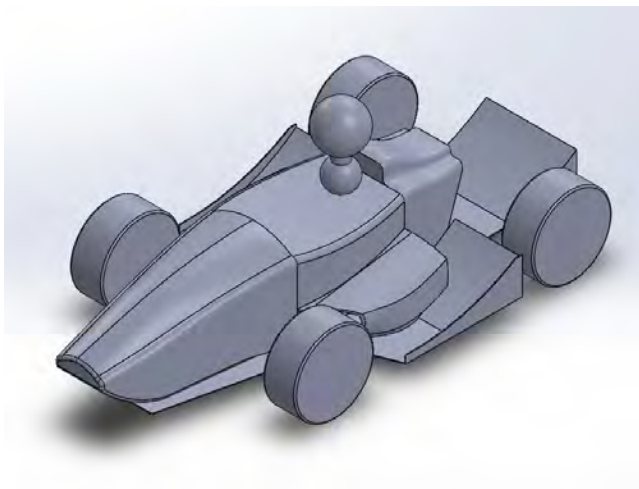
A continuación detallaremos algunos aspectos del monoplaza que se podrían mejorar para desarrollos futuros. En primer lugar aportamos imágenes del monoplaza definitivo con intención de observar de manera más detallada el diseño y posteriormente comentaremos posibles mejoras.



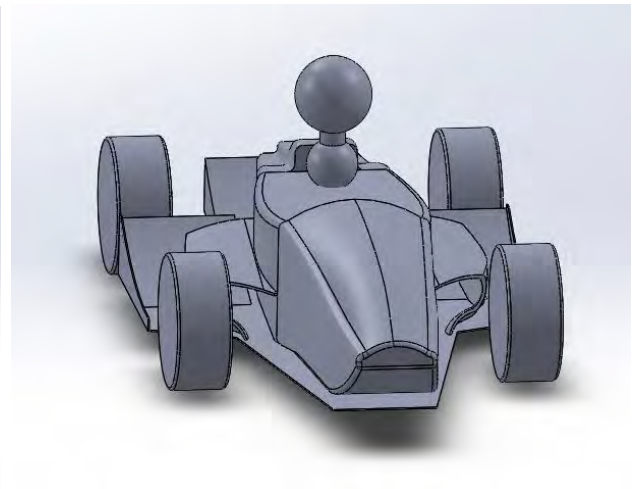
(a) Perfil monoplace



(b) Vista personalizada de trasera del monoplace



(c) Vista trimétrica del monoplace



(d) Vista personalizada delantera del monoplace

Figura 10.3: Diferentes vistas de carrocería.

El diseño general de la carrocería como se ha comprobado en el proyecto ha resultado ser más eficiente que el del año pasado, y también se han conseguido realizar formas mucho más vistosas, haciendo un vehículo con personalidad y estilo.

10.2.1. Implantación de alerones:

En cuanto a funcionalidad uno de los aspectos fundamentales que le faltan al presente monoplace es la instalación de alerones. Como se ha mencionado en capítulos anteriores los alerones son los componentes principales en la generación de *Downforce* del monoplace. A su vez la instalación del alerón delantero disminuye de manera importante el “*Drag*” producido por el monoplace, ya que evita por medio de los perfiles alares que el aire incida directamente en las ruedas delanteras, que son una de las principales fuentes de “*Drag*” en el vehículo. Como se comprobó el año pasado la instalación de alerones puede mejorar la eficiencia del monoplace en un 200 %, observar la siguiente Figura 10.4.

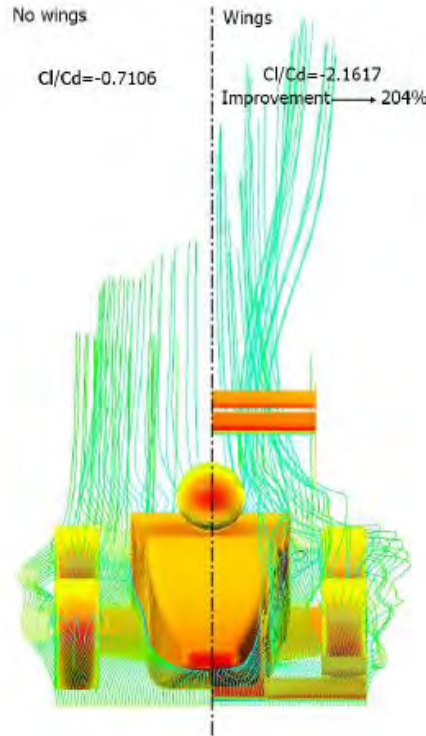


Figura 10.4: Comparación de líneas de corriente entre monoplaça con y sin alerones. Fuente: Carlos Sánchez, equipo FUC3M

El “*Drag*” generado por los neumáticos delanteros es tan elevado debido al efecto de rotación, cuya velocidad en el cuarto superior de la rueda en el sentido del avance es contraria al flujo de aire. Es por esto que el flujo tiende a frenarse contra el neumático y cambiar su trayectoria hacia la zona inferior del neumático que es la que gira en sentido del flujo.

La instalación del alerón trasero como se observa en la Figura 10.4 provoca que el flujo aerodinámico defleccione hacia arriba, esta deflexión es una clara demostración de la creación de carga generada dado que por la segunda ley de Newton, si levantamos una corriente de aire el efecto que genera es una carga que empuja el vehículo hacia el pavimento, produciendo el efecto deseado.

En el presente proyecto no se ha realizado la instalación de estos dispositivos, debido a la falta de capacidad computacional del ordenador. La introducción de los siguientes componentes hubieran añadido una gran cantidad de elementos al cálculo, de manera que hubiera sido imposible la realización de los mismos. Por este motivo en el presente proyecto se tomó como objetivo principal el mejorar el paquete aerodinámico sin alerones. Dando opción a futuros compañeros a desarrollarlos e implantarlos en la carrocería.

10.2.2. Mejora de los difusores:

Los difusores del monoplaza son una de la principal fuente de *Downforce* del monoplaza y por ello su desarrollo es importante. Existen diferentes maneras en las que podemos mejorar el rendimiento de los difusores:

- **Doble difusor:** Como se ha mencionado en capítulos anteriores el doble difusor consigue extraer más aire, de modo que aumenta la velocidad del flujo de aire por debajo del coche disminuyendo la presión y por tanto consiguiendo un aumento de *Downforce*.

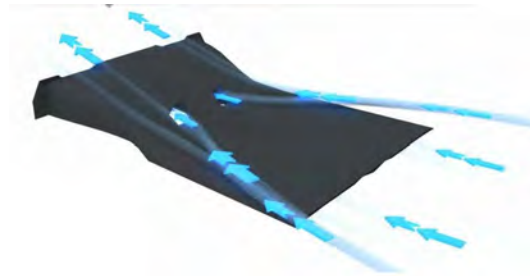


Figura 10.5: Imagen doble difusor

- **Difusor soplado:** Dichos difusores aumentan su rendimiento debido a que los gases de escape van dirigidos hacia ellos. La temperatura y velocidad de dichos gases aumentan la capacidad de succión. El rendimiento de estos sistemas no es constante, pues depende de la cantidad de gases que se le inyectan al difusor de esta manera que no sea uno de los componentes más utilizados en la FSAE, pues la realización de cálculos es muy compleja a la hora de demostrar su rendimiento en pruebas como el *Design*.

10.2.3. Mejora de los pontones:

Los pontones es una de las piezas en las que menos se presta atención a la hora de diseñar, pues no es de vital importancia que por sí mismas generen *Downforce*, ya que se encuentran componentes como el escape, la refrigeración... Sin embargo la implantación de dispositivos aerodinámicos en los pontones puede ser un atributo diferenciador con el resto de competidores de la FSAE [2]. Se podrían añadir diferentes tipos de aletas, como las que se han mencionado en capítulos anteriores, o incluso realizar un conjunto de branquias para mejorar la refrigeración. Cualquier implante de nuevos dispositivos bien referenciados y explicados, pueden ser una fuente importante de puntos en el *Design*.

Capítulo 11

Conclusiones:

Realizar el diseño de una carrocería que permita mejorar el buen rendimiento y la correcta dinámica en pista del monoplace del año anterior. Para ello se deberán mejorar los valores de resistencia y carga aerodinámica, en busca de una mayor eficiencia.

Este objetivo ha sido cumplido y queda demostrado por:

- La eficiencia conseguida por la carrocería de la temporada 2016 de -0.7106, ha sido mejorada un 46 % con el diseño de la carrocería del presente proyecto, consiguiendo una relación entre los coeficientes de sustentación y resistencia de -1.0379.
- Con la eficiencia actual se consigue un aumento en la carga aerodinámica, lo que le permite al monoplace tomar las curvas a mayor velocidad, debido al aumento de la fuerza lateral admitida por cada neumático.

Validar el uso de *Virtual Wind Tunnel 13.1* de Altair®[6], como nueva herramienta de cálculo en el equipo FUC3M.

Gracias al patrocinio de Altair®[6], facilitando las licencias de sus programas, se han podido utilizar por primera vez programas de procesado y cálculo como *Hypermesh Desktop 13.0* y *Virtual Wind Tunnel 13.1*.

Para su utilización se ha realizado una ardua búsqueda de información y realización de tutoriales, también se ha asistido a una serie de seminarios impartidos en su sede de Madrid y se ha mantenido un contacto continuado con los ingenieros de la empresa, dispuestos a responder cualquier duda que surgiera a la hora de utilizar el programa.

Tras el proceso de aprendizaje, se ha comprobado que es una potente herramienta de cálculo en el que de una manera rápida y sencilla podemos obtener datos de los diferentes componentes aerodinámicos de nuestro monoplace o del ensamblaje completo. Tras el pequeño tutorial elaborado en el presente proyecto, tanto *Hypermesh Desktop 13.0* como *Virtual Wind Tunnel 13.1* se convierten en una nueva alternativa para el resto de componentes del equipo. En el que sería interesante someterlo a comparación con los diferentes programas que ya disponemos.

La elección del diseño óptimo en función de la relación de eficiencias aerodinámicas entre las diferentes opciones.

Para la elección de cada uno de los componentes del monoplaza se ha realizado previamente una selección entre diferentes alternativas de diseño:

- Para la elección del fondo plano y sus difusores, en un primer momento se compararon las diferentes longitudes disponibles, llegando a la conclusión que la longitud límite era capaz de generar más carga aerodinámica que el resto de difusores con longitud menor. Posteriormente se realizó el estudio de la inclinación, en el que se compararon las diferentes eficiencias de cada uno de los ángulos, el resultado fue el siguiente:

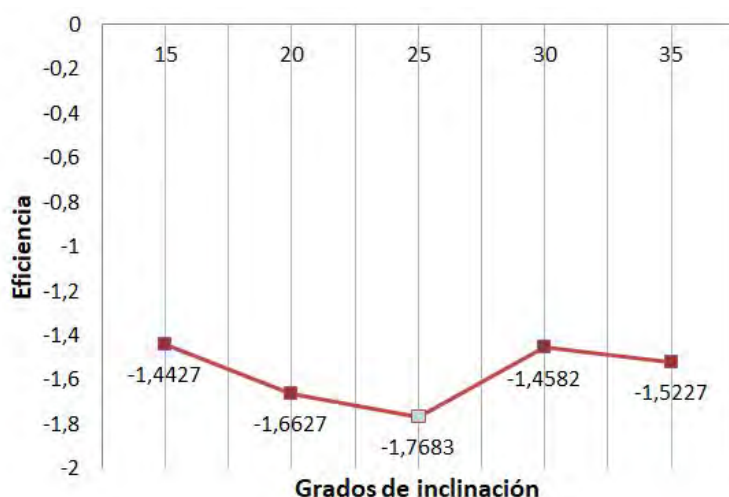


Figura 11.1: Gráfica de diferentes eficiencias en función de la inclinación del difusor.

Seleccionando los difusores con una inclinación de 25 grados por su mayor eficiencia.

- A la hora de la selección del ensamblaje final, también se han tenido en cuenta las eficiencias de cada uno de los monoplazas. Se han valorado las diferentes opciones de pontones diseñados, escogiendo el más eficiente como diseño definitivo.

Ensamblaje	Eficiencia
Pontón Recto	-0.9835
Curvatura 1	-0.9873
Curvatura 2	-1.0379

Tabla 11.1: Valores de eficiencias de los diferentes ensamblajes.

Como ya se demostró en capítulos anteriores el ensamblaje con los pontones que poseían la curvatura más pronunciada (curvatura 2), era el más eficiente, convirtiéndose en el monoplaza definitivo.

Realizar un estudio aerodinámico detallado que nos permita conseguir puntos para las pruebas estáticas.

Como se ha detallado a lo largo del proyecto, cada una de las selecciones de diseño ha sido justificada y fundamentada en cálculos, consiguiendo que el diseño definitivo mejore el funcionamiento en pista del monoplaza.

Al igual que el año pasado, se espera que el desarrollo del diseño aerodinámico ayude positivamente en la puntuación de diseño en la prueba estática.

Conseguir que el vehículo vuelva a ser atractivo para los patrocinadores y el público general de la competición, como lo fue el año pasado.

El suavizado en las líneas de diseño y la forma algo más compleja, hace del nuevo prototipo un monoplaza mucho más vistoso que el conseguido el año pasado. Con la ayuda de la pintura de Mercedes Benz Madrid, seguro que vuelve a ser el centro de las miradas.

Capítulo 12

Costes:

12.1. Costes de diseño y simulación:

A continuación, realizaremos una tabla de costes, en la que contaremos las horas calculadas anteriormente y las multiplicaremos por el salario de un ingeniero, en este caso tomaremos un salario de (20€) la hora. El coste de diseño y simulación es el siguiente:

BASE DE CONOCIMIENTO		TOTAL HORAS
Búsqueda de información y tutoriales (Hypermesh y Virtual Wind Tunnel)	Aproximadamente 2 meses: 2h/día x 15días/mes x 2 meses	30h
Cursos sede Altair de Virtual Wind Tunnel y Hypermesh	2 sesiones x 10h/sesión	20h

DISEÑO Y SIMULACIÓN			SIMULACIONES		TOTAL HORAS
	Variantes	Horas diseño	Course	Medium	
Diseño en papel	4	5h/diseño	-		20h
Carrocería CAD	5	3h/cad	2h/cad	5h/cad	50h
Difusores + Fondo Plano	14	1h/cad	-	3h/cad	42h
Ensamblaje Base	1	5h/cad	6h/cad	8h/cad	18h
Carrocería + F.P y Difusores	3	1h/cad	5h/cad	8h/cad	42h
Carrocería + F.P y Difusores+ Pontones	4	5h/cad	6h/cad	8h/cad	76h
Conjunto de simulaciones fallidas					40h
Salario por horas de un ingeniero					20€
TOTAL HORAS DE DISEÑO Y SIMULACIÓN					338h
COSTE TOTAL					6.760€

COSTE TOTAL EN ELECTRICIDAD			
Consumo del PC (Kw)	Precio (€/kWh)	Total de horas	Coste Total (€)
0.15 Kw	0,121	338	6,1347

Figura 12.1: Tabla de costes de diseño y simulación.

COSTE TOTAL EN USO DE MATERIAL:				
Producto	Coste Total Producto (€)	Años de vida	Años de uso	Coste Total (€)
Lenovo Idea Z70-80	965	5	1	193
Logitech M220	22,95	2	1	11.47
COSTE TOTAL				204,47€

COSTE DE LICENCIAS UTILIZADAS		COSTE ANUAL (€)
Licencia paquete Altair ®		30.000
Licencia versión estudiante Solidworks 2015		99,99
COSTE TOTAL		30.099,99

COSTE TOTAL DISEÑO, SIMULACIÓN, ELECTRICIDAD, MATERIAL Y LICENCIAS	37.070,60€
--	------------

Figura 12.2: Tabla de costes totales de diseño y simulación.

12.2. Costes de material y fabricación:

No hay manera de realizar una tabla de costes ajustada de material y fabricación cuando no se tienen definidas todas las características de la carrocería. El diseño del prototipo presentado en el presente trabajo, se puede ver modificado en función de las diferentes necesidades de componentes a incorporar o posibles cambios en la normativa.

De modo que, a continuación, se adjunta una tabla de costes genéricos tanto de material, como de procesos de fabricación, sacados de los criterios de costes de la competición, para elementos aerodinámicos. En ellos se han seleccionado los materiales que se utilizarán y los procesos de fabricación necesarios. Para conseguir un coste total, se introducirá la cantidad de material utilizado y el número de horas empeñadas en cada proceso.

Material	Categoría	Precio	Unidad	Comentarios
Fibra de Carbono	Composite	200.00\$	kg	Seco o Pre-Preg. Ambos incluyen resina. Se permite el recorte manual.
Fibra de Vidrio	Composite	100.00\$	kg	Seco o Pre-Preg. Ambos incluyen resina. Se permite el recorte manual.
Espuma Estructural	Composite	125.00\$	kg	Cualquier tamaño y densidad. Se permite recorte manual
Espuma extruida, No estructural	Composite	15.00\$	kg	Espuma extruida usada en los asientos. No se permite su utilización como panel de Sándwich.

Figura 12.3: Tabla de costes de material.

La fibra de vidrio se utilizaría para realizar las piezas de sustitución, en caso de que alguna de las principales de fibra de carbono sufriera algún daño en la competición.

Proceso	Coste Ud.	Unidad	Categoría	Maquinaria necesaria	Comentarios
Curado, autoclave	50.00\$	m ²	Composite	Sí	Incluye todo material consumible y trabajo.
Curado, horno	20.00\$	m ²	Composite	Sí	Incluye todo material consumible y trabajo.
Curado, temperatura ambiente	10.00\$	m ²	Composite	Sí	Incluye todo material consumible y trabajo.
Laminación manual	35.00\$	m ²	Composite	No	
Laminación mecanizada	100.00\$	m ²	Composite	Sí	Solo contará el área de superficie útil para la geometría deseada.
Aplicación resina, mecanizada	2.50\$	m ²	Composite		
Aplicación resina, manual	5.00\$	m ²	Composite		Si la fibra utilizada es pre-peg, no incluir costes de aplicación de resina
Ensamblaje piezas <1kg	0.13\$	Unidad	Trabajo	No	
Aplicación con brocha	0.02\$	cm ²	Trabajo	No	Para uso con pegamento, pintura, resina etc.
Realización de taladros <50.8mm dia.	0.70\$	Agujero	Retirada de material	Sí	Agujeros >50.8mm dia. Deben de ser mecanizado
Preparación de superficie	0.02\$	cm ²	Retirada de material	Sí	Lijado manual, limpieza u otras operaciones utilizadas para preparar la superficie para uniones.
Lijado manual, para acabados	0.20\$	cm ³	Retirada de material		Lijado manual, rectificado o cualquier actividad que tenga que ver con la retirada de material para el acabado.

Figura 12.4: Tabla de costes de procesos de fabricación.

Capítulo 13

Planos:

A continuación, se muestran diferentes planos de los componentes del monoplaza diseñados, se reservan algunas de las medidas principales para salvaguardar la privacidad del equipo y evitar posibles plagios.

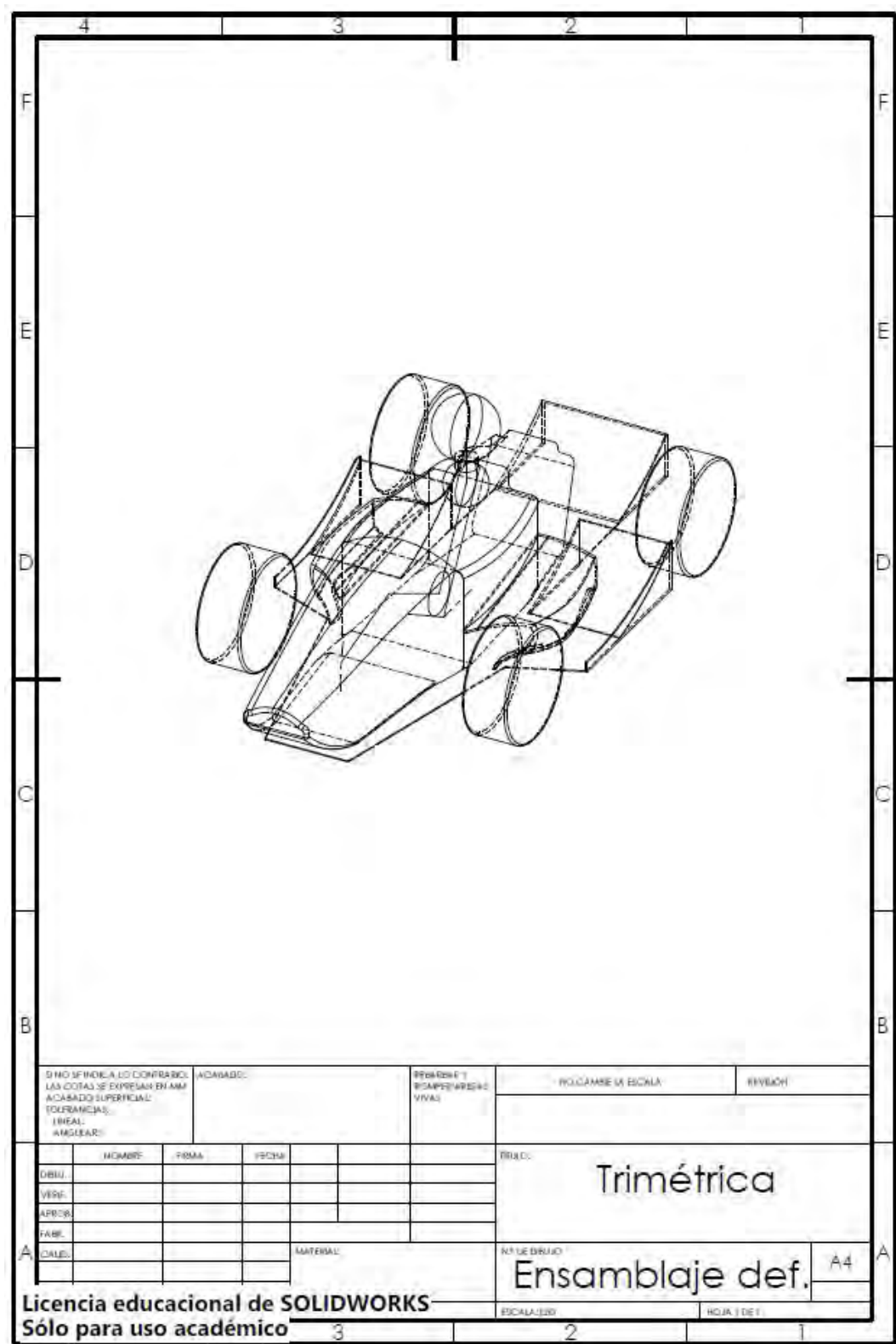


Figura 13.1: Vista trimétrica del monoplace.

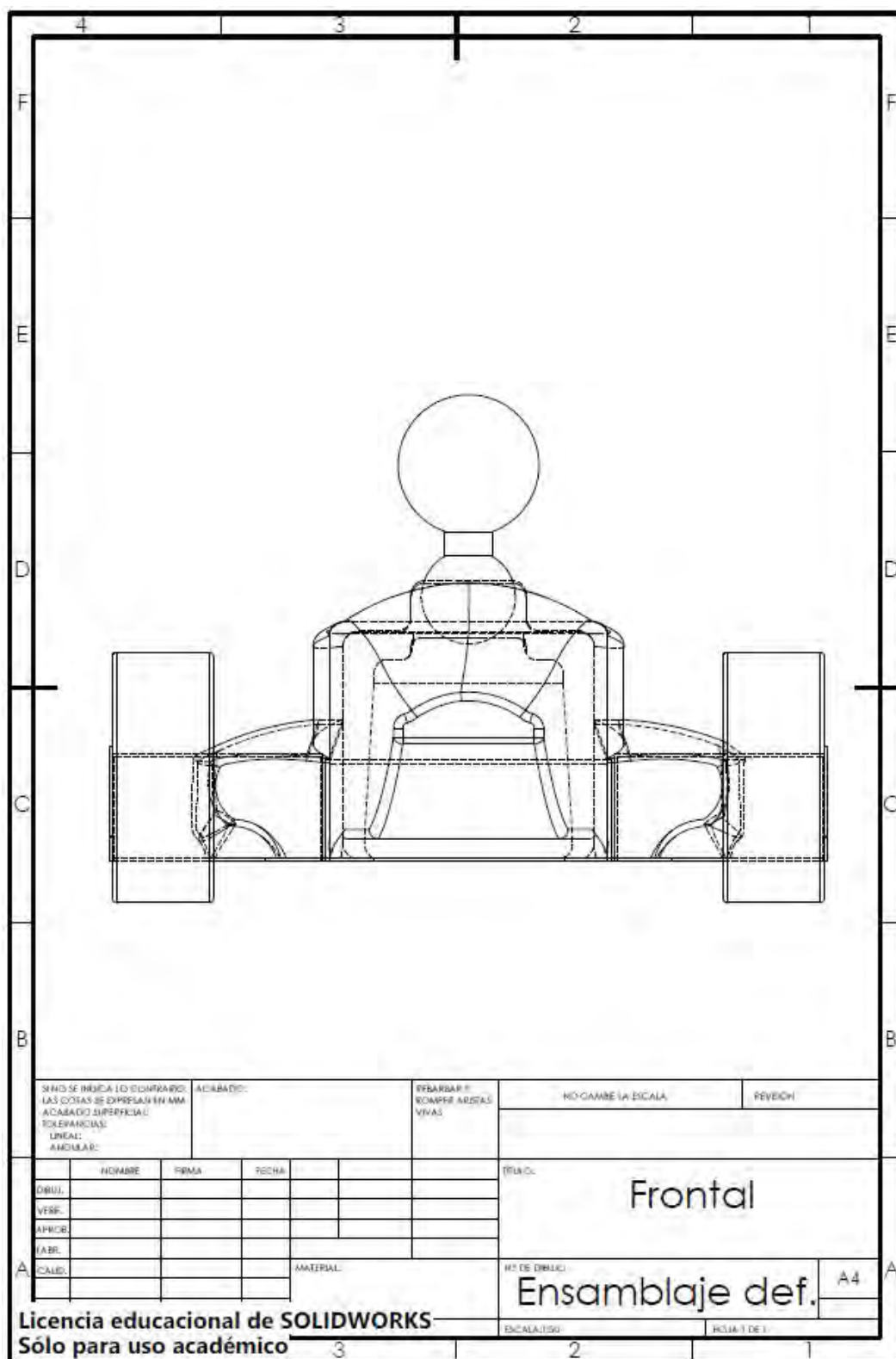


Figura 13.2: Vista frontal del monoplace.

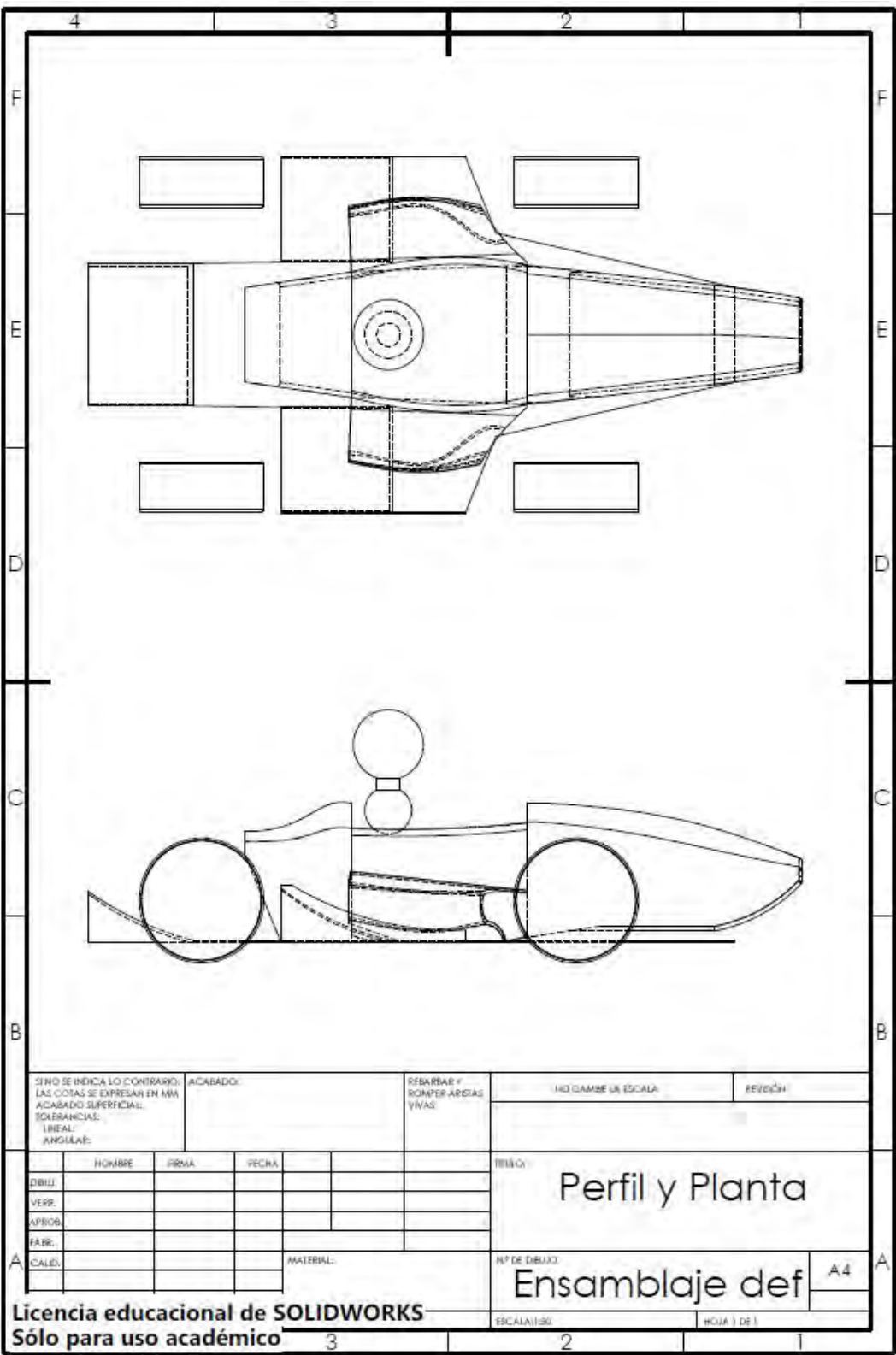


Figura 13.3: Vista de perfil y planta del monoplace.

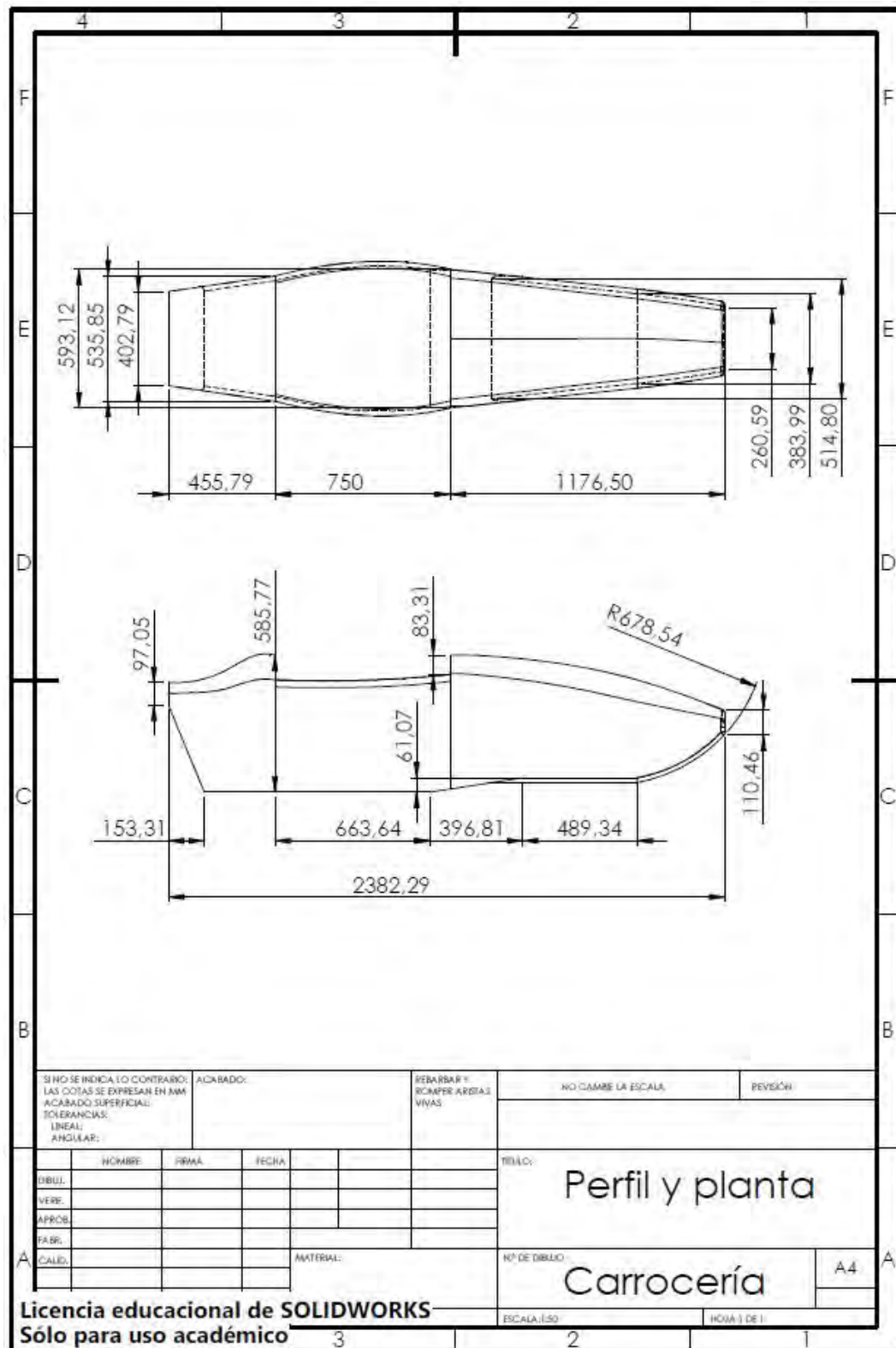
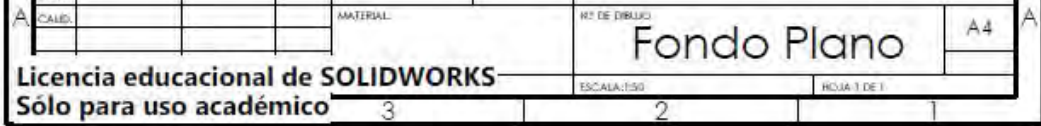


Figura 13.4: Vista de perfil y planta de la carrocería.



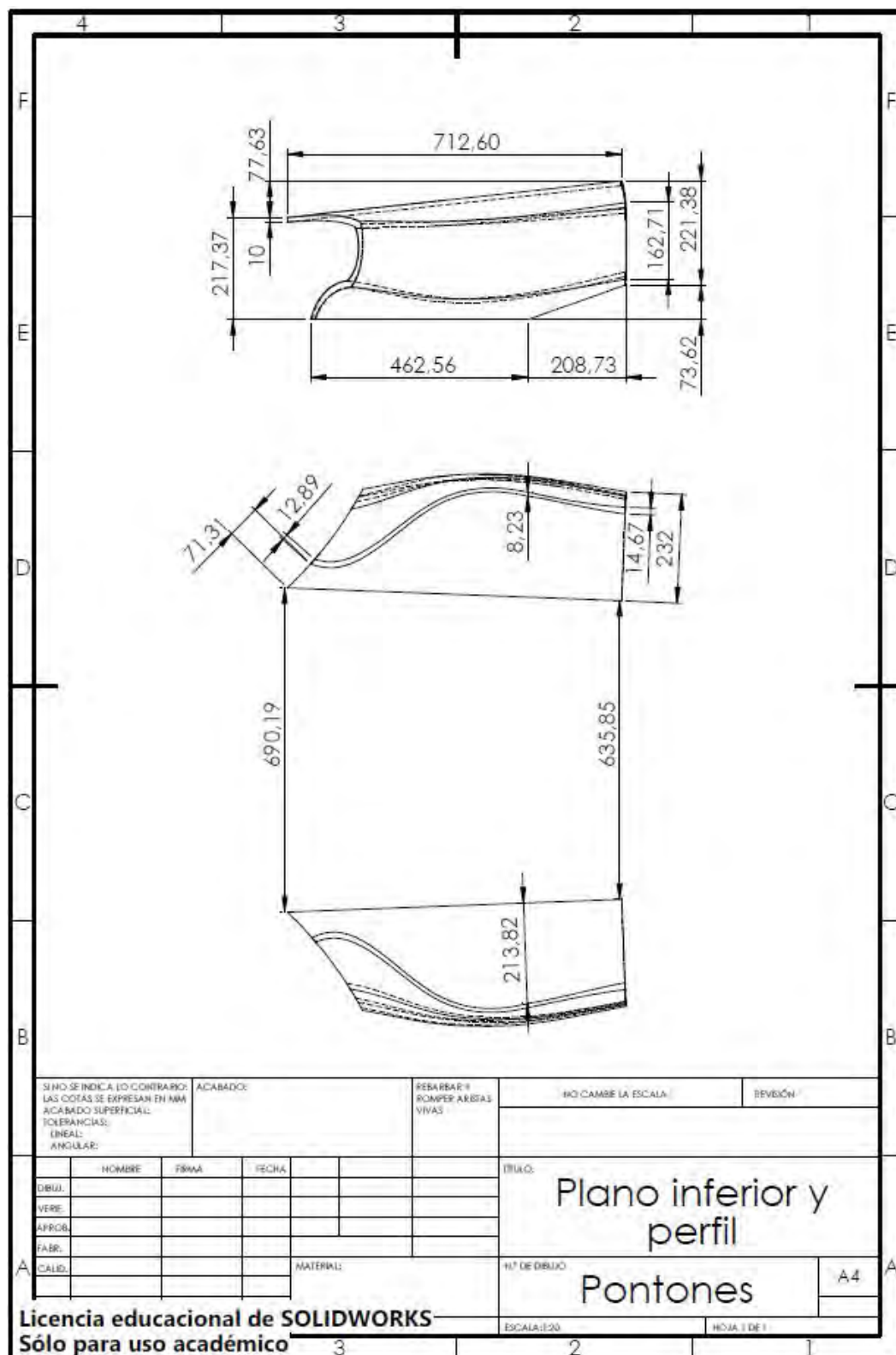


Figura 13.6: Vista de perfil y planta de los pontones.

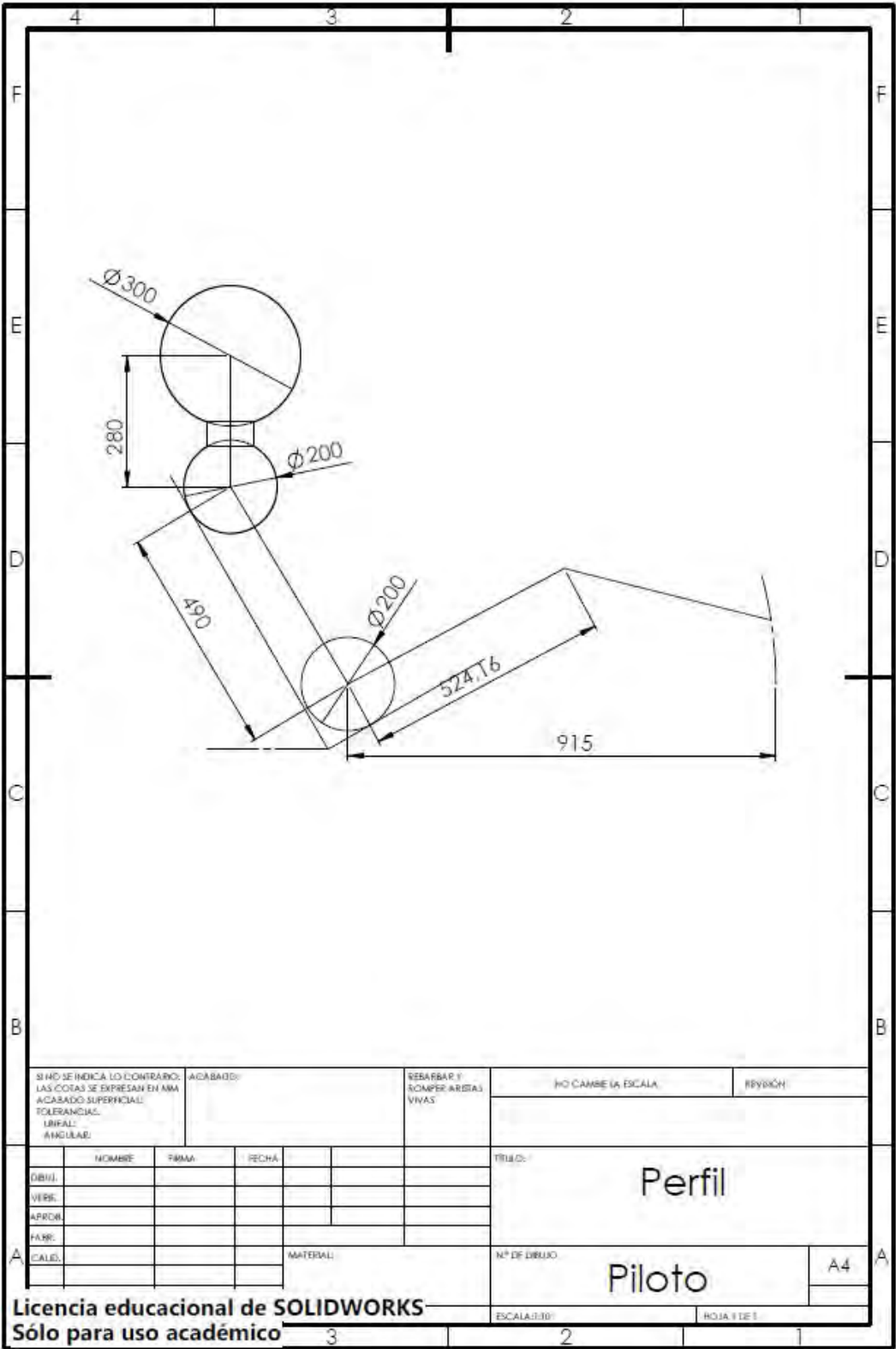


Figura 13.7: Vista de perfil de piloto.

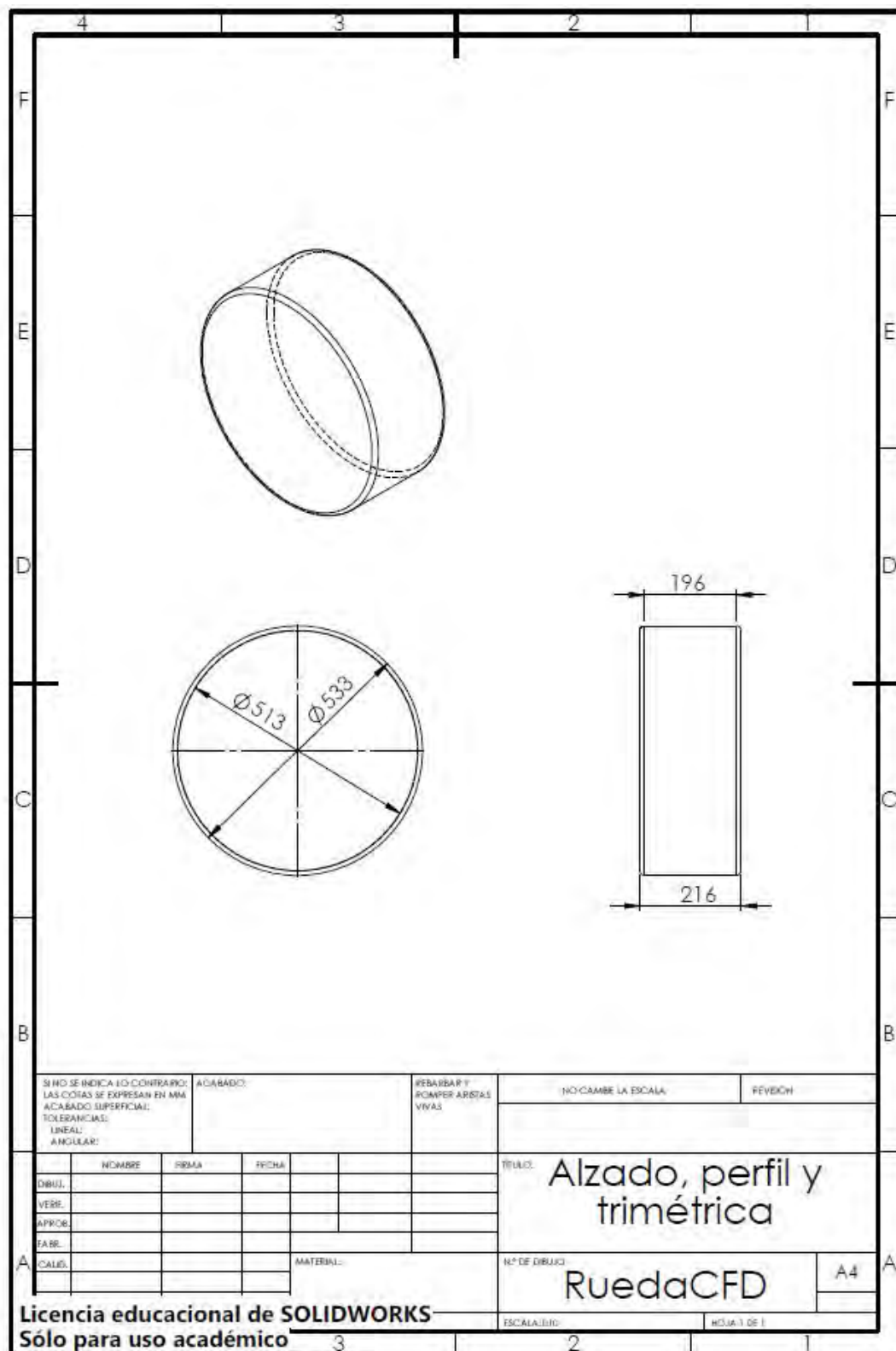


Figura 13.8: Vista de trimétrica, alzado y perfil de la rueda.

Referencias

- [1] P. N. Yianilos and S. Sobti, *The Envolving Field of Distributed Storage*, IEEE Computing, September-October 2001, pp. 35-39.
<http://csulasae.wdfiles.com/local-files/baja/Baja>
- [2] Formula Student, Institution of Engineering & Technology.
<http://formulastudent.imeche.org/formula-student/>, Fecha de último acceso: 07/01/2017
- [3] SAE International, Formula SAE Rules 2016.
- [4] Google Inc. <http://www.google.es>, Fecha último acceso: 20/01/2017
- [5] Dassault Systèmes SolidWorks Corp. <http://www.solidworks.es>, Fecha último acceso: 20/01/2017
- [6] Altair Engineering, Inc. <http://www.altair.com/> Fecha último acceso: 20/01/2017
- [7] FIDAMC, "Fundación para la Investigación, Desarrollo y Aplicación de Materiales Compuestos". <http://fidamc.es/es-es/inicio> , Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [8] Wikipedia, <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Dut13.jpg>, Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [9] Baja SAE, <https://www.bajasae.net/>, Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [10] Wikidot, <http://csulasae.wikidot.com/baja>, Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [11] Formula Student, Institution of Engineering & Technology.
<http://formulastudent.imeche.org/formula-student/about-us/history>, Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [12] FS Total. <http://www.fstotal.com/history-2/>, Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [13] Multiboy. <http://www.multibody.net/teaching/dissertations/setup-optimization-for-the-fsae-car-mg07-12/attachment/11-3/>, Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [14] FSAESIM, <http://www.fsaesim.com/track.html>, Fecha de último acceso: 07/02/2017

-
- [15] AMZ Racing, <http://www.amzracing.ch/en/formula-student>, Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [16] F1 Web, <http://www.f1-web.com.ar/gpargentina/argentina53.JPG>, Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [17] YFIA, "Your Future In Automotive" <http://www.yourfutureinautomotive.com/competitions/formula-student-events>, Fecha de último acceso: 07/02/2017
- [18] Fieras de la ingeniería, <http://www.fierasdelaingenieria.com/la-aerodinamica-en-la-formula-1/>, Fecha de último acceso: 08/02/2017
- [19] Taringa Post, FanáticosF1, <http://www.taringa.net/comunidades/f1fans/9026695/La-evolucion-aerodinamica-en-la-F1.html>, Fecha de último acceso: 08/02/2017
- [20] Museo Fangio, <http://www.museofangio.com/img/autos/gaimg-278.jpg>, Fecha de último acceso: 08/02/2017
- [21] Enciclopedia mundial de automóviles, Only Carz, <https://v1.std3.ru/70/8b/1404574532-708b36ce0ce5371a03663768216a6cf7.jpg>, Fecha de último acceso: 08/02/2017
- [22] The Formula One GP, the best Formula 1 reviews, <https://theformulaonegp.wordpress.com/historia-completa-de-la-formula-1/>, Fecha de último acceso: 08/02/2017
- [23] Hiper Textual, Los fórmula 1 más especiales de la historia, <http://hipertextual.com/2015/10/mejores-coches-formula-1>, Fecha de último acceso: 08/02/2017
- [24] IMCDB, Internet Movie Cars DataBase, http://www.imcdb.org/vehicle_462519-Lotus-25.html, Fecha de último acceso: 08/02/2017
- [25] Snap Lap, <http://www.snaplap.net/car-spotlight-tyrrell-p34/>, Fecha de último acceso: 08/02/2017.
- [26] Fast Magazine, http://fast-mag.com/wp-content/uploads/2014/08/Page_53_image_003.jpg, Fecha de último acceso: 10/02/2017
- [27] Wikipedia, Brabham BT46, https://en.wikipedia.org/wiki/Brabham_BT46, Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [28] Taringa, La historia del efecto suelo, <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/6717605/Formula-Uno-La-Historia-del-efecto-suelo.html>, Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [29] Flickr, https://c2.staticflickr.com/8/7394/12466767483_100f49bcb7b.jpg, Fecha de último acceso: 10/02/2017.
-

-
- [30] Motor.es, [http : //www.motor.es/formula-1/f1-deflectores-laterales-historia-201521772.html](http://www.motor.es/formula-1/f1-deflectores-laterales-historia-201521772.html), Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [31] Static Motors, [http : //static.motor.es/fotos-noticias/2015/06/min652x435/los-deflectores-laterales-una-historia-de-reciclaje-201521772_6.jpg](http://static.motor.es/fotos-noticias/2015/06/min652x435/los-deflectores-laterales-una-historia-de-reciclaje-201521772_6.jpg), Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [32] Blog Ángeles en la cabeza, [http : //angelesenlacabeza.blogspot.com.es/2012/02/01archive.html](http://angelesenlacabeza.blogspot.com.es/2012/02/01archive.html), Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [33] Foro Técnica de la Fórmula 1, [http : //tecnicafomula1.com/analisis-tecnico-de-toda-la-parrilla-en-los-tests-postgp-de-austria-f1-2015/](http://tecnicafomula1.com/analisis-tecnico-de-toda-la-parrilla-en-los-tests-postgp-de-austria-f1-2015/), Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [34] F1 SK, [http : //image.f1.sk/obrazky/5/5201.jpg](http://image.f1.sk/obrazky/5/5201.jpg), Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [35] MotorsTown, [http : //www.motorstown.com/images/benetton-renault-07.jpg](http://www.motorstown.com/images/benetton-renault-07.jpg), Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [36] Pinterest, [https : //es.pinterest.com/pin/355291858073411987/](https://es.pinterest.com/pin/355291858073411987/), Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [37] F1 Fanatic, [http : //www.f1fanatic.co.uk/wp-content/uploads/2012/05/f2002-schu-ferr-spaf-2002.jpg](http://www.f1fanatic.co.uk/wp-content/uploads/2012/05/f2002-schu-ferr-spaf-2002.jpg), Fecha de último acceso: 10/02/2017.
- [38] F1 Facts, [http : //f1-facts.com/gallery/d/2825](http://f1-facts.com/gallery/d/2825), Fecha de último acceso: 13/02/2017.
- [39] Car & Driver The F1, [http : //www.caranddriverthef1.com/sites/default/files/imce/u12/brawn_p2009difusor.jpg](http://www.caranddriverthef1.com/sites/default/files/imce/u12/brawn_p2009difusor.jpg), Fecha de último acceso: 13/02/2017.
- [40] Avante Service, Video evolución de la aerodinámica en un F1, [http : //www.avanteservices.com/es/blog/?p=1047](http://www.avanteservices.com/es/blog/?p=1047), Fecha de último acceso: 15/02/2017.
- [41] Scarbs F1, [http : //scarbsf1.com/](http://scarbsf1.com/), Fecha de último acceso: 15/02/2017.
- [42] Grandprix, [http : //www.grandprix.com/jpeg/misc/redbull2010launch1-xl.jpg](http://www.grandprix.com/jpeg/misc/redbull2010launch1-xl.jpg), Fecha de último acceso: 15/02/2017.
- [43] Forum Simple Machine, [http : //www.pescasub.com/foros/index.php?topic=27620.465](http://www.pescasub.com/foros/index.php?topic=27620.465), Fecha de último acceso: 15/02/2017.
- [44] FormulaF1.es, [http : //www.formulaf1.es/25009/adios-a-las-narices-escalonadas-y-al-doble-drs-en-2013/](http://www.formulaf1.es/25009/adios-a-las-narices-escalonadas-y-al-doble-drs-en-2013/), Fecha de último acceso: 15/02/2017.
- [45] Antena 3, [http : //www.antena3.com/formula-1/mundial-2012/corea/noticias/adrian-newey-secreto-doble-drs_20121014000005.html](http://www.antena3.com/formula-1/mundial-2012/corea/noticias/adrian-newey-secreto-doble-drs_20121014000005.html), Fecha de último acceso: 15/02/2017.
-

-
- [46] F1 Tornello, [http : //www.f1tornello.com/2012/09/como - funciona - el - doble - drs.html](http://www.f1tornello.com/2012/09/como-funciona-el-doble-drs.html), Fecha de último acceso: 15/02/2017.
- [47] Camaroons F1, [http : //camaroonsf1.com/como - se - hace - un - f1 - en - el - tunel - de - viento - aprendelo - con - nosotros - f1 - ciencia/](http://camaroonsf1.com/como-se-hace-un-f1-en-el-tunel-de-viento-aprendelo-con-nosotros-f1-ciencia/), Fecha de último acceso: 20/02/2017.
- [48] ConceptoDefinición.de: -El Fluido, [http : //conceptodefinicion.de/fluido/](http://conceptodefinicion.de/fluido/), Fecha de último acceso: 20/02/2017.
- [49] Química para todos: Conservación de la materia, [http : //quimicaparatodos.blogcindario.com/2009/10/00148 - ley - de - conservacion - de - la - masa - de - lavoisier.html](http://quimicaparatodos.blogcindario.com/2009/10/00148-ley-de-conservacion-de-la-masa-de-lavoisier.html), Fecha de último acceso: 20/02/2017.
- [50] Educa+: Conservación de la cantidad de movimiento, [http : //www.educaplus.org/momentolineal/conservacion_momento_ineal.html](http://www.educaplus.org/momentolineal/conservacion_momento_lineal.html), Fecha de último acceso: 20/02/2017.
- [51] FisicaLab: Primera ley de la termodinámica, [https : //www.fisicalab.com/apartado/primer - principio - termocontenidos](https://www.fisicalab.com/apartado/primer-principio-termocontenidos), Fecha de último acceso: 23/02/2017.
- [52] FisicaLab: Segunda ley de la termodinámica, [https : //www.fisicalab.com/apartado/segundo - principio - termocontenidos](https://www.fisicalab.com/apartado/segundo-principio-termocontenidos), Fecha de último acceso: 23/02/2017.
- [53] Wikipedia: Esquema del principio de Bernoulli, [https : //es.wikipedia.org/wiki/Principio_deBernoulli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli), Fecha de último acceso: 8/03/2017.
- [54] Sabelotodo.org: Tubo de Venturi, [http : //www.sabelotodo.org/fluidos/imagenes/venturi.png](http://www.sabelotodo.org/fluidos/imagenes/venturi.png), Fecha de último acceso: 14/03/2017.
- [55] Sobre Ruedas: Sección de un alerón, [http : //2.bp.blogspot.com/ - H7nXgjbkQdI/UaM9vEyKeLI/AAAAAAAAALgM/x6hLmb92JY/s1600/perfil.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-H7nXgjbkQdI/UaM9vEyKeLI/AAAAAAAAALgM/x6hLmb92JY/s1600/perfil.jpg), Fecha de último acceso: 14/03/2017.
- [56] Wikipedia: Imagen: Efecto Coanda, [https : //upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7a/Efecto_coanda.jpg/300px - Efecto_coanda.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7a/Efecto_coanda.jpg/300px-Efecto_coanda.jpg), Fecha de último acceso: 14/03/2017.
- [57] Diario Motor: Resistencia Aerodinámica, [http : //www.diariomotor.com/tecmovia/2011/11/27/enemigos - de - la - eficiencia - la - resistencia - aerodinamica/](http://www.diariomotor.com/tecmovia/2011/11/27/enemigos-de-la-eficiencia-la-resistencia-aerodinamica/), Fecha de último acceso: 25/03/2017.
- [58] La Bitácora de Vuelo: Coeficiente de Resistencia Aerodinámica, [http : //www.labitacoradevuelo.com.ar/2015/09/fuerza - de - arrastre - de - un - globo - a105.html](http://www.labitacoradevuelo.com.ar/2015/09/fuerza-de-arrastre-de-un-globo-a105.html), Fecha de último acceso: 25/03/2017.
-

-
- [59] Blog: Era pixel: Imagen Tunel de Viento, *http : //blog.erapixel.com/wp - content/uploads/2014/03/tuneldeviento.jpg*, Fecha de último acceso: 30/03/2017.
- [60] Global Formula Racing: Michigan FSAE 2013, *http : //www.global - formula - racing.com/wp - content/uploads/2016/05/87453463808299125c52c.jpg*, Fecha de último acceso: 30/03/2017.
- [61] Simon Mc. Beath, Aerodinámica del automóvil de competición.
- [62] Técnica F1: Foro Pedro de la Rosa, *http : //www.pedrodelarosa.com/foro/index.php? showtopic = 10695*, Fecha de último acceso: 30/03/2017
- [63] Car and driver the F1: Alerón trasero, *http : //www.caranddriverthef1.com/formula1/blogs/angelesf1/aerodinamica - como - se - adapta - un - f1 - los - diferentes - niveles - carga*, Fecha de último acceso: 10/04/2017.
- [64] Formula F1: Fondo Plano, *http : //www.formulaf1.es/36459/comprendiendo - un - f1 - parte - 7/*, Fecha de último acceso: 15/04/2017.
- [65] Blog: Eduardo José car: Imagen venturi y difusores dobles, *http : //eduardojosecar.blogspot.com.es/2009/04/funcionamiento - del - polemico - difusor - de.html*, Fecha de último acceso: 18/04/2017.
- [66] F1 a día: Difusores soplados, *http : //www.f1aldia.com/12578/el - difusor - soplado/*, Fecha de último acceso: 18/04/2017.
- [67] Electric Race car, *https : //mcuoneclipse.com/2013/08/31/electric - race - car - julier - wins - at - red - bull - ring - in - spielberg/*, Fecha de último acceso: 18/04/2017.
- [68] Motor Sport: Imagen aleta pontón, *http : //es.motorsport.com/f1/news/breve - analisis - tecnico - desviadores - del - flujo - en - el - mclaren - mp4 - 31 - 732084/*, Fecha de último acceso: 20/04/2017.
- [69] Motor Sport: Imagen aleta pontón, *http : //www.motorsport - total.com/bilder/2005/gp/0502mal/so/z241.jpg*, Fecha de último acceso: 20/04/2017.
- [70] Albrodpulf1: Imagen aleta pontón, *https : //farm2.staticflickr.com/1705/25049611692644763276e_o.jpg*, Fecha de último acceso: 20/04/2017.
- [71] Car and driver the F1: Turbuladores, *http : //www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2014/04/21/90513 - articulo - tecnico - del - gp - china - f1 - 2014*, Fecha de último acceso: 20/04/2017.
- [72] Técnica F1: Deflectores Laterales, *https : //tecnicaf1.wordpress.com/2011/12/08/elementos - aerodinamicos - de - un - formula - 1/*, Fecha de último acceso: 25/04/2017.
-

-
- [73] T Life: Imagen túnel de viento, [http : //s3 - eu - west - 1.amazonaws.com/tliffe - cdn/wp - content/uploads/2015/04/06095642/formula1 - 974.jpg](http://s3-eu-west-1.amazonaws.com/tliffe-cdn/wp-content/uploads/2015/04/06095642/formula1-974.jpg), Fecha de último acceso: 26/04/2017.
- [74] Que Fórmula 1: Imagen esquema del túnel de viento, [http : //www.que - formula1.com/wp - content/uploads/2009/03/tunel - viento - 01.jpg](http://www.que-formula1.com/wp-content/uploads/2009/03/tunel-viento-01.jpg), Fecha de último acceso: 26/04/2017.
- [75] Reflexión en Boxes: Esquema de fuerzas del monoplaça, [http : //reflexionesenboxes.blogspot.com.es/2011/10/formula - 1 - disenando - perfeccion - parte - 1.html](http://reflexionesenboxes.blogspot.com.es/2011/10/formula-1-disenando-perfeccion-parte-1.html), Fecha de último acceso: 28/04/2017.
- [76] CD-Adapco: Imagen CFD Virtual Wind Tunnel, [http : //www.cd - adapco.com/cfdImage/virtual - wind - tunnel - analysis - f1 - race - car](http://www.cd-adapco.com/cfdImage/virtual-wind-tunnel-analysis-f1-race-car), Fecha de último acceso: 28/04/2017.
- [77] Técnica F1: Imagen CFD, [http : //www.tecnicaf1.es/wp - content/uploads/2015/01/cfd22.jpg](http://www.tecnicaf1.es/wp-content/uploads/2015/01/cfd22.jpg), Fecha de último acceso: 30/04/2017.
- [78] Motor.es: Imagen mallado CFD, [http : //www.motor.es/formula - 1/f1 - dinamica - computacional - fluidos - 201521393.html](http://www.motor.es/formula-1/f1-dinamica-computacional-fluidos-201521393.html), Fecha de último acceso: 30/04/2017.
- [79] Universidad Carlos III: Inicio, [http : //www.uc3m.es/Inicio](http://www.uc3m.es/Inicio), Fecha de último acceso: 14/05/2017.
- [80] Mercedes Benz - Madrid, [http : //www.madrid.mercedes - benz.es/content/spain/retail - 0/mercedes - benz - madrid/es/desktop/home.html](http://www.madrid.mercedes-benz.es/content/spain/retail-0/mercedes-benz-madrid/es/desktop/home.html), Fecha de último acceso: 15/05/2017.
- [81] AutoBild, [http : //www.autobild.es/sites/default/files/galerias/brabham_t49.jpg](http://www.autobild.es/sites/default/files/galerias/brabham_t49.jpg), Fecha de último acceso: 15/05/2017.
- [82] Daily news 24, [http : //www.dailynews24.it/wp - content/uploads/2015/03/1363154 - 29257016 - 1600 - 900.jpg](http://www.dailynews24.it/wp-content/uploads/2015/03/1363154-29257016-1600-900.jpg), Fecha de último acceso: 15/05/2017.
- [83] Blog aeronáutico, [https : //greatbustardsflight.blogspot.com.es/2015/05/aerodinamica - torbellinos - o - remolinos - y.html](https://greatbustardsflight.blogspot.com.es/2015/05/aerodinamica-torbellinos-o-remolinos-y.html), Fecha de último acceso: 15/05/2017.
- [84] ANSYS 17.2, [http : //www.ansys.com/products/fluids](http://www.ansys.com/products/fluids), Fecha de último acceso: 01/06/2017
- [85] Aerospace Engineering, [http : //aerospaceengineeringblog.com/boundary - layer - separation - and - pressure - drag/](http://aerospaceengineeringblog.com/boundary-layer-separation-and-pressure-drag/), Fecha de último acceso: 13/06/2017
- [86] Máster en construcción, [http : //materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/496/544](http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/496/544), Fecha de último acceso: 16/06/2017
-

-
- [87] KM77, revista técnica motor, *[https : //www.km77.com/tecnica/bastidor/angderiva/t01.asp](https://www.km77.com/tecnica/bastidor/angderiva/t01.asp)*,
Fecha de último acceso: 16/06/2017
- [88] JOSEPH KATZ, Aerodynamics of Race Cars; Departament of Aerospace Engineering,
San Diego State University, San Diego, California, 2016.
-